

Bambang Haryadi



Fisika



Untuk SMA/MA Kelas XI



PUSAT PERBUKUAN
Departemen Pendidikan Nasional

Hak Cipta pada Departemen Pendidikan Nasional
Dilindungi Undang-undang

Bambang Haryadi

FISIKA

Untuk SMA/MA Kelas XI



PUSAT PERBUKUAN
Departemen Pendidikan Nasional

Hak Cipta pada Departemen Pendidikan Nasional dilindungi Undang-undang

Fisika

Untuk SMA/MA Kelas XI

Disusun oleh:

Bambang Haryadi

Editor : Diah Nuraini

Design Cover : Desteka

Setting/Layout : Ike Marsanti, Esti Pertiwi

530.07

BAM

BAMBANG Haryadi

f
;

Fisika : Untuk SMA/MA Kelas XI / disusun Oleh Bambang Haryadi

editor, Diah Nuraini. — Jakarta : Pusat Perbukuan,
Departemen Pendidikan Nasional, 2009.
iv, 234 hlm. : illus. : 25 cm.

Bibliografi : hlm.227-228

Indeks

ISBN 978-979-068-166-8 (no.jld.lengkap)

ISBN 978-979-068-172-9

1.Fisika-Studi dan Pengajaran I. Judul II. Diah Nuraini

Buku ini telah dibeli hak ciptanya oleh
Departemen Pendidikan Nasional dari
Penerbit CV Teguh Karya

Diterbitkan oleh Pusat Perbukuan
Departemen Pendidikan Nasional
Tahun 2008

Diperbanyak Oleh:...

Kata Sambutan • • •

Puji syukur kami panjatkan ke hadirat Allah SWT, berkat rahmat dan karunia-Nya, Pemerintah, dalam hal ini, Departemen Pendidikan Nasional, pada tahun 2008, telah membeli hak cipta buku teks pelajaran ini dari penulis/penerbit untuk disebarluaskan kepada masyarakat melalui situs internet (*website*) Jaringan Pendidikan Nasional.

Buku teks pelajaran ini telah dinilai oleh Badan Standar Nasional Pendidikan dan telah ditetapkan sebagai buku teks pelajaran yang memenuhi syarat kelayakan untuk digunakan dalam proses pembelajaran melalui Peraturan Menteri Pendidikan Nasional Nomor 22 Tahun 2007 tanggal 25 Juni 2007.

Kami menyampaikan penghargaan yang setinggi-tingginya kepada para penulis/penerbit yang telah berkenan mengalihkan hak cipta karyanya kepada Departemen Pendidikan Nasional untuk digunakan secara luas oleh para siswa dan guru di seluruh Indonesia.

Buku-buku teks pelajaran yang telah dialihkan hak ciptanya kepada Departemen Pendidikan Nasional ini, dapat diunduh (*down load*), digandakan, dicetak, dialihmediakan, atau difotokopi oleh masyarakat. Namun, untuk penggandaan yang bersifat komersial harga penjualannya harus memenuhi ketentuan yang ditetapkan oleh Pemerintah. Diharapkan bahwa buku teks pelajaran ini akan lebih mudah diakses sehingga siswa dan guru di seluruh Indonesia maupun sekolah Indonesia yang berada di luar negeri dapat memanfaatkan sumber belajar ini.

Kami berharap, semua pihak dapat mendukung kebijakan ini. Kepada para siswa kami ucapkan selamat belajar dan manfaatkanlah buku ini sebaik-baiknya. Kami menyadari bahwa buku ini masih perlu ditingkatkan mutunya. Oleh karena itu, saran dan kritik sangat kami harapkan.

Jakarta, Februari 2009
Kepala Pusat Perbukuan

Kata Pengantar ●●●

Puji syukur patut kalian panjatkan ke hadirat Tuhan Yang Maha Esa karena dengan rahmat dan karunia-Nya kalian memperoleh kesempatan untuk melanjutkan belajar ke jenjang berikutnya.

Saat ini kalian akan diajak kembali belajar tentang Fisika. Fisika merupakan salah satu cabang IPA yang mendasari perkembangan teknologi maju dan konsep hidup harmonis dengan alam.

Perkembangan pesat di bidang teknologi informasi dan komunikasi dewasa ini, sedikit banyak dipicu oleh temuan-temuan di bidang fisika material melalui penemuan piranti mikroelektronika yang mampu memuat banyak informasi dengan ukuran yang sangat kecil. Oleh karena itu, sebagai seorang pelajar kalian perlu memiliki kemampuan berpikir, bekerja, dan bersikap ilmiah serta berkomunikasi sebagai salah satu aspek penting kecakapan hidup di era globalisasi ini.

Buku ini ditulis untuk memenuhi kebutuhan kalian akan pengetahuan, pemahaman, dan sejumlah kemampuan yang dipersyaratkan untuk memasuki jenjang pendidikan yang lebih tinggi serta mengembangkan ilmu dan teknologi. Selain itu, juga untuk membantu kalian mengembangkan kemampuan bernalar, mengembangkan pengalaman, memupuk sikap ilmiah, dan membentuk sikap positif terhadap fisika. Buku ini memuat aspek materi fisika yang menekankan pada segala bentuk fenomena alam dan pengukurannya, gerak benda dengan berbagai hukumnya, penerapan gejala gelombang dalam berbagai bidang ilmu fisika, dan lain-lain yang disusun secara sistematis, komprehensif, dan terpadu. Dengan demikian, kalian akan memperoleh pemahaman yang lebih luas dan mendalam tentang aspek-aspek tersebut.

Akhirnya, semoga buku ini bermanfaat bagi kalian dalam memperoleh pengetahuan, pemahaman, dan kemampuan menganalisis segala hal yang berkaitan dengan fenomena alam sehingga kalian mampu hidup selaras berdasarkan hukum alam, mampu mengelola sumber daya alam dan lingkungan, serta mampu mengurangi dampak bencana alam di sekitar kalian.

Selamat belajar, semoga sukses.

Juli, 2007

Penulis

Daftar Isi

KATA SAMBUTAN	iii
KATA PENGANTAR	iv
DAFTAR ISI	v
BAB 1 KINEMATIKA DENGAN ANALISIS VEKTOR	1
A. Posisi Titik Materi pada Suatu Bidang	2
B. Kecepatan	4
C. Percepatan	9
D. Gerak Lurus	13
E. Gerak Parabola	15
F. Gerak Melingkar	19
Kilas Balik	25
Uji Kompetensi	27
BAB 2 GRAVITASI PLANET DALAM SISTEM TATA SURYA	31
A. Hukum Gravitasi Newton	32
B. Percepatan Gravitasi	34
C. Penerapan Hukum Gravitasi Newton	36
D. Hukum-Hukum Kepler	39
Kilas Balik	43
Uji Kompetensi	44
BAB 3 PENGARUH GAYA PADA ELASTISITAS BAHAN	47
A. Elastisitas Zat Padat	48
B. Tegangan dan Regangan	49
C. Hukum Hooke	52
D. Analisis Gerakan Pegas	54
Kilas Balik	64
Uji Kompetensi	65
BAB 4 USAHA DAN ENERGI	69
A. Usaha	70
B. Energi	74
C. Daya	78
D. Hukum Kekekalan Energi Mekanik	79
Kilas Balik	82
Uji Kompetensi	83
BAB 5 MOMENTUM DAN IMPULS	87
A. Pengertian Momentum dan Impuls	88
B. Hukum Kekekalan Momentum	90

	C. Tumbukan	92
	D. Aplikasi Hukum Kekekalan Momentum	96
	Kilas Balik	99
	Uji Kompetensi	99
	UJI KOMPETENSI SEMESTER 1	102
BAB 6	DINAMIKA ROTASI DAN KESETIMBANGAN BENDA TEGAR.	111
	A. Momen Gaya (Torsi)	112
	B. Momen Inersia	114
	C. Hubungan antara Momen Gaya dengan Percepatan Sudut.....	117
	D. Energi dan Usaha Gerak Rotasi	118
	E. Momentum Sudut	120
	F. Keseimbangan Benda	123
	Kilas Balik	134
	Uji Kompetensi	136
BAB 7	FLUIDA	141
	A. Tekanan dan Tekanan Hidrostatik	142
	B. Hukum Dasar Fluida Statis	144
	C. Tegangan Permukaan	153
	D. Fluida Dinamis	159
	Kilas Balik	170
	Uji Kompetensi	172
BAB 8	TEORI KINETIK GAS	177
	A. Hukum-Hukum tentang Gas	179
	B. Teori Kinetik Gas	185
	C. Teori Ekipartisi Energi	189
	Kilas Balik	193
	Uji Kompetensi	194
BAB 9	TERMODINAMIKA	197
	A. Usaha dan Proses dalam Termodinamika	198
	B. Hukum I Termodinamika	202
	C. Siklus pada Termodinamika	207
	D. Hukum II Termodinamika.....	210
	Kilas Balik	213
	Uji Kompetensi	214
	UJI KOMPETENSI SEMESTER 2	217
	GLOSARIUM	226
	DAFTAR PUSTAKA	227
	DAFTAR KONSTANTA	229
	KUNCI JAWABAN	232
	INDEKS	233

BAB

1

KINEMATIKA DENGAN ANALISIS VEKTOR



- Jet tempur bergerak di udara pada bidang horizontal dan vertikal.

Sumber: *Encarta Encyclopedia*, 2006

Setiap benda dapat bergerak, daun-daun bergerak, hewan berpindah tempat, dan mobil melaju. Benda dikatakan bergerak apabila posisinya berubah terhadap titik acuan. Perhatikan gambar di atas, jet tempur bergerak melakukan akrobatik di udara. Jet tempur itu bergerak pada bidang horizontal dan vertikal. Untuk mengetahui posisi benda pada waktu tertentu digunakan persamaan gerak yang meliputi posisi, kecepatan, percepatan, dan hubungan ketiganya.

Kata Kunci

gerak lurus,
gerak melingkar,
gerak parabola,
kecepatan, percepatan,
posisi, waktu



Sumber: Dokumen Penerbit, 2006

Gambar 1.1 Mobil berjalan dikatakan melakukan gerak lurus.

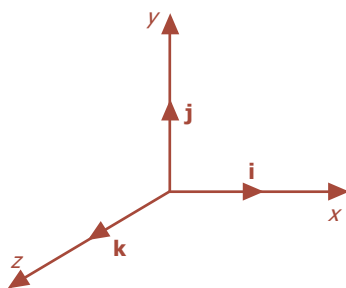
Pada saat kelas X, kalian telah mempelajari gerak. Coba ingat kembali, apakah yang dimaksud gerak? Gerak merupakan perubahan posisi benda terhadap suatu titik acuan. Gerak benda sudah menjadi bagian dari kejadian nyata dalam kehidupan sehari-hari. Mobil bergerak, buah kelapa jatuh dari tangkainya, pesawat terbang di angkasa, bahkan bulan adalah contoh dari benda bergerak.

Ilmu yang mempelajari gerak disebut **mekanika**. Mekanika dibedakan menjadi dua yaitu kinematika dan dinamika. Kinematika adalah ilmu yang mempelajari gerak tanpa memerhatikan penyebabnya. Apa saja yang dipelajari dalam kinematika? Konsep kinematika berhubungan dengan posisi, kecepatan, percepatan, dan waktu yang berkaitan erat, yaitu perubahan posisi dalam selang waktu tertentu menyebabkan adanya kecepatan, dan perubahan kecepatan menyebabkan adanya percepatan.

Sebuah mobil yang sedang bergerak lurus memiliki kecepatan yang setiap saat dapat kita baca nilainya dari *spidometer* yang ada pada kendaraan tersebut, tetapi tidak dapat langsung menyatakan posisi di mana kita berada. Untuk mengetahui posisi benda pada waktu tertentu, kalian akan mempelajari hubungan antara posisi, kecepatan, dan percepatan yang dinyatakan dalam persamaan gerak. Kemampuan dasar yang harus dimiliki untuk mempelajari bab ini adalah vektor, fungsi turunan, dan integral.



A. Posisi Titik Materi pada Suatu Bidang



Gambar 1.2 Vektor satuan pada sumbu x , y , dan z adalah \mathbf{i} , \mathbf{j} , dan \mathbf{k} .

Posisi suatu benda dapat diketahui dengan menggambarannya dalam suatu bidang. Posisi titik materi pada suatu bidang dapat dinyatakan dalam bentuk vektor. Oleh karena itu terlebih dahulu kita bahas tentang vektor satuan dalam bidang.

1. Vektor Satuan

Vektor satuan adalah vektor yang besarnya satu satuan. Dalam sistem koordinat kartesius ada tiga jenis vektor satuan, yaitu \mathbf{i} , \mathbf{j} , \mathbf{k} yang saling tegak lurus dan masing-masing menyatakan arah sumbu x , y , dan z positif. Perhatikan Gambar 1.2 di samping.

Vektor-vektor satuan tersebut dapat dioperasikan dalam penjumlahan, pengurangan, perkalian, dan pembagian. Misalnya, vektor \mathbf{A} berada pada bidang x dan y (Gambar 1.3) maka vektor \mathbf{A} dapat dinyatakan berikut ini.

Jika komponen vektor A ditulis dalam vektor satuan, maka:

$$A_x = A_x \mathbf{i} = (A \cos \alpha) \mathbf{i}$$

$$A_y = A_y \mathbf{j} = (A \sin \alpha) \mathbf{j}$$

sehingga:

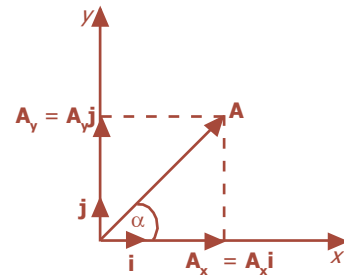
$$A = A_x + A_y$$

$$A = A_x \mathbf{i} + A_y \mathbf{j}$$

$$A = (A \cos \alpha) \mathbf{i} + (A \sin \alpha) \mathbf{j} \dots\dots\dots (1.1)$$

Besarnya vektor A adalah:

$$A = \sqrt{A_x^2 + A_y^2} \dots\dots\dots (1.2)$$



Gambar 1.3 Vektor A dalam vektor satuan \mathbf{i} dan \mathbf{j} .

2. Vektor Posisi

Posisi atau kedudukan suatu titik materi dinyatakan oleh vektor posisi, yaitu vektor yang dibuat dari titik acuan ke arah titik materi tersebut. Perhatikan Gambar 1.4, sebuah titik materi terletak di $A(x_1, y_1)$, maka vektor posisi titik tersebut dituliskan dengan:

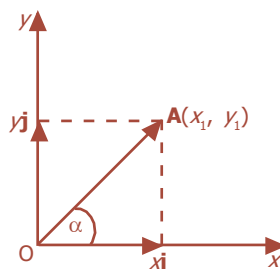
$$\mathbf{r} = x\mathbf{i} + y\mathbf{j} \dots\dots\dots (1.3)$$

Besarnya vektor posisi adalah:

$$r = \sqrt{x^2 + y^2} \dots\dots\dots (1.4)$$

Arah vektor \mathbf{r} (α) dapat ditentukan dengan persamaan:

$$\tan \alpha = \frac{y}{x} \dots\dots\dots (1.5)$$



Gambar 1.4 Posisi titik materi pada bidang XOY.

Jika terjadi perpindahan tempat, maka vektor posisi juga berubah. Perpindahan adalah perubahan posisi suatu benda pada waktu tertentu. Perhatikan Gambar 1.5, sebuah titik materi mula-mula berada di $A(x_1, y_1)$ dengan vektor posisi \mathbf{r}_A , kemudian bergerak dengan lintasan sembarang sampai di $B(x_2, y_2)$, dengan vektor posisi \mathbf{r}_B . Besarnya perpindahan titik materi tersebut ($\Delta \mathbf{r}$) adalah:

$$\Delta \mathbf{r} = \mathbf{r}_B - \mathbf{r}_A \dots\dots\dots (1.6)$$

Persamaan (1.6) dapat dinyatakan dalam vektor satuan:

$$\Delta \mathbf{r} = (x_2 \mathbf{i} + y_2 \mathbf{j}) - (x_1 \mathbf{i} + y_1 \mathbf{j})$$

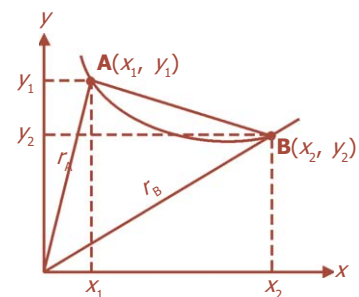
$$\Delta \mathbf{r} = x_2 \mathbf{i} - x_1 \mathbf{i} + y_2 \mathbf{j} - y_1 \mathbf{j}$$

$$\Delta \mathbf{r} = (x_2 - x_1) \mathbf{i} + (y_2 - y_1) \mathbf{j}$$

$$\Delta \mathbf{r} = \Delta x \mathbf{i} + \Delta y \mathbf{j} \dots\dots\dots (1.7)$$

Besarnya perpindahan adalah:

$$\Delta r = \sqrt{\Delta x^2 + \Delta y^2} \dots\dots\dots (1.8)$$



Gambar 1.5 Perpindahan titik materi.

Komet

Kolom mengingat

Pada saat $t = t_1$, maka vektor posisinya \mathbf{r}_1 dan pada saat $t = t_2$, maka vektor posisinya \mathbf{r}_2 dan perpindahan partikel adalah $\Delta \mathbf{r} = \mathbf{r}_2 - \mathbf{r}_1$.

Sebuah materi bergerak pada bidang datar dengan lintasan sembarang dari titik A (3,5) ke titik B (5,1), tentukan:

- a. vektor perpindahan, b. besarnya perpindahan!

Penyelesaian:

Diketahui: $\mathbf{r}_A = 3\mathbf{i} + 5\mathbf{j}$

$$\mathbf{r}_B = 5\mathbf{i} + \mathbf{j}$$

Ditanya: a. vektor $\Delta \mathbf{r} = \dots$?

b. $\mathbf{r} = \dots$?

Jawab:

- a. Vektor perpindahan

$$\Delta \mathbf{r} = (\Delta x \mathbf{i} + \Delta y \mathbf{j})$$

$$= (x_2 - x_1)\mathbf{i} + (y_2 - y_1)\mathbf{j}$$

$$= (5 - 3)\mathbf{i} + (1 - 5)\mathbf{j}$$

$$\Delta \mathbf{r} = 2\mathbf{i} - 4\mathbf{j}$$

- b. Besarnya perpindahan

$$\Delta \mathbf{r} = \sqrt{\Delta x^2 + \Delta y^2}$$

$$= \sqrt{2^2 + (-4)^2}$$

$$= \sqrt{4+16} = \sqrt{20} = 2\sqrt{5}$$

Uji Kemampuan 1.1

Sebuah materi memiliki vektor posisi yang dinyatakan dengan $\mathbf{r} = (2t^2)\mathbf{i} + (2t^2+t)\mathbf{j}$. Tentukan vektor perpindahan materi tersebut jika $t = 1$ s dan $t = 2$ s! Tentukan pula besar perpindahannya!



Kecepatan

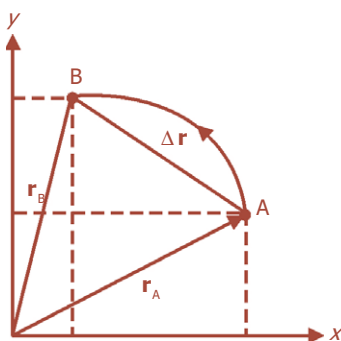
Kecepatan merupakan perpindahan (perubahan posisi) suatu benda terhadap satuan waktu. Kecepatan merupakan besaran vektor karena memiliki arah.

1. Kecepatan Rata-Rata

Berdasarkan Gambar 1.6 dapat diketahui bahwa perubahan posisi benda (titik materi) dari A ke B adalah $\Delta \mathbf{r} = \mathbf{r}_B - \mathbf{r}_A$, sedangkan selang waktu yang diperlukan adalah $\Delta t = t_B - t_A$. Hasil bagi antara perpindahan dan selang waktu tersebut adalah kecepatan rata-rata yang dirumuskan:

$$\bar{\mathbf{v}} = \frac{\Delta \mathbf{r}}{\Delta t} = \frac{\mathbf{r}_B - \mathbf{r}_A}{t_B - t_A} \dots\dots\dots (1.9)$$

dengan:

$$\bar{v} = \text{kecepatan rata-rata (m/s)}$$
$$\Delta \mathbf{r} = \text{perpindahan (m)}$$
$$\Delta t = \text{selang waktu (s)}$$


Gambar 1.6 Kecepatan rata-rata memiliki arah yang sama dengan arah perpindahan.

Persamaan (1.9) apabila dinyatakan dalam vektor satuan, maka:

$$\begin{aligned}\bar{\mathbf{v}} &= \frac{\Delta x \mathbf{i} + \Delta y \mathbf{j}}{\Delta t} = \frac{\Delta x}{\Delta t} \mathbf{i} + \frac{\Delta y}{\Delta t} \mathbf{j} \\ \bar{\mathbf{v}} &= v_x \mathbf{i} + v_y \mathbf{j} \dots\dots\dots (1.10)\end{aligned}$$

dengan:

$\bar{\mathbf{v}}$ = kecepatan rata-rata

$v_x = \frac{\Delta x}{\Delta t}$ = komponen kecepatan rata-rata pada sumbu x

$v_y = \frac{\Delta y}{\Delta t}$ = komponen kecepatan rata-rata pada sumbu y

Tanda garis di atas besaran $\bar{\mathbf{v}}$ menyatakan harga rata-rata, arah kecepatan rata-rata $\bar{\mathbf{v}}$ searah dengan perpindahan $\Delta \mathbf{r}$.

2. Kecepatan Sesaat

Jika kalian mengendarai sepeda motor sepanjang jalan yang lurus sejauh 100 km dalam waktu 2 jam, besar kecepatan rata-ratanya adalah 50 km/jam. Walaupun demikian, tidak mungkin kalian mengendarai sepeda motor tersebut tepat 50 km/jam setiap saat. Untuk mengetahui situasi ini, kita memerlukan konsep kecepatan sesaat yang merupakan kecepatan pada suatu waktu. **Kecepatan sesaat** adalah kecepatan rata-rata pada limit selang waktu Δt mendekati nol. Secara matematis kecepatan sesaat dituliskan:

$$\mathbf{v} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta \mathbf{r}}{\Delta t} = \frac{d\mathbf{r}}{dt} \dots\dots\dots (1.11)$$

$\frac{d\mathbf{r}}{dt}$ adalah turunan pertama fungsi vektor posisi terhadap waktu.

Jika $\mathbf{r} = x\mathbf{i} + y\mathbf{j}$ dan $\Delta \mathbf{r} = \Delta x\mathbf{i} + \Delta y\mathbf{j}$

Maka,

$$\begin{aligned}\mathbf{v} &= \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \left(\frac{\Delta x}{\Delta t} \mathbf{i} + \frac{\Delta y}{\Delta t} \mathbf{j} \right) \\ \mathbf{v} &= \frac{d}{dt}(x\mathbf{i} + y\mathbf{j}) \\ \mathbf{v} &= \frac{dx}{dt} \mathbf{i} + \frac{dy}{dt} \mathbf{j} \\ \mathbf{v} &= v_x \mathbf{i} + v_y \mathbf{j} \dots\dots\dots (1.12)\end{aligned}$$

dengan:

\mathbf{v} = vektor kecepatan sesaat (m/s)

$v_x = \frac{dx}{dt}$ = komponen kecepatan sesaat pada sumbu x (m/s)

$v_y = \frac{dy}{dt}$ = komponen kecepatan sesaat pada sumbu y (m/s)

Arah kecepatan sesaat merupakan arah garis singgung lintasan di titik tersebut.



Sumber: CD ClipArt

Gambar 1.7 Kecepatan rata-rata *roller coaster* dihitung dari jarak lintasan dibagi waktu yang diperlukan.



Sumber: Jawa Pos, 18 Juni 2006

Gambar 1.8 Ketika mengendarai sepeda motor memerlukan konsep kecepatan sesaat.

BETA[®] Berita Fisika

Notasi turunan dari fungsi vektor diperkenalkan oleh Gottfried Wilhelm Leibniz (1646 - 1716) seorang ahli matematika dari Jerman.

Contoh Soal

1. Sebuah partikel mula-mula berada pada posisi A (4 m, 5 m). Setelah 2 sekon partikel berada pada posisi B (6 m, 3 m), tentukan:
- vektor perpindahan,
 - besarnya perpindahan,
 - vektor kecepatan rata-rata, dan
 - besarnya kecepatan rata-rata!

Penyelesaian:

Diketahui: $\mathbf{r}_A = (4\mathbf{i} + 5\mathbf{j}) \text{ m}$
 $\mathbf{r}_B = (6\mathbf{i} + 3\mathbf{j}) \text{ m}$
 $\Delta t = 2 \text{ s}$

- Ditanyakan: a. vektor $\Delta \mathbf{r} = \dots$?
b. $\Delta r = \dots$?
c. vektor $\bar{\mathbf{v}} = \dots$?
d. $\bar{v} = \dots$?

Jawab:

- a. Vektor perpindahan

$$\Delta \mathbf{r} = (x_B - x_A)\mathbf{i} + (y_B - y_A)\mathbf{j} = (6 - 4)\mathbf{i} + (3 - 5)\mathbf{j} = 2\mathbf{i} - 2\mathbf{j}$$

- b. Besarnya perpindahan

$$\Delta r = \sqrt{\Delta x^2 + \Delta y^2} = \sqrt{2^2 + (-2)^2} = \sqrt{4+4} = \sqrt{8} = 2\sqrt{2} \text{ m}$$

- c. Vektor kecepatan rata-rata

$$\bar{\mathbf{v}} = \frac{\Delta x}{\Delta t}\mathbf{i} + \frac{\Delta y}{\Delta t}\mathbf{j} = \frac{2}{2}\mathbf{i} + \frac{(-2)}{2}\mathbf{j} = \mathbf{i} - \mathbf{j}$$

- d. Besarnya kecepatan rata-rata

$$\bar{v} = \sqrt{\left(\frac{\Delta x}{\Delta t}\right)^2 + \left(\frac{\Delta y}{\Delta t}\right)^2} = \sqrt{\left(\frac{2}{2}\right)^2 + \left(\frac{-2}{2}\right)^2} = \sqrt{2} \text{ m/s}$$

2. Sebuah partikel bergerak lurus ke arah sumbu x dengan persamaan $x = 5t^2 + 4t - 1$, x dalam meter dan t dalam sekon. Tentukan kecepatan sesaat pada waktu $t = 2$ sekon!

Penyelesaian:

Diketahui: Persamaan posisi partikel $r = (5t^2 + 4t - 1)\mathbf{i}$

Ditanya: $\mathbf{v} = \dots$? ($t = 2 \text{ s}$)

Jawab:

$$\begin{aligned}\mathbf{v} &= \frac{d}{dt}(x\mathbf{i} + y\mathbf{j}) \\ &= \frac{d}{dt}(5t^2 + 4t - 1)\mathbf{i} \\ &= (10t + 4)\mathbf{i}\end{aligned}$$

Untuk $t = 2 \text{ s}$

$$\mathbf{v} = (10)(2) + 4 = 20 + 4 = 24 \text{ m/s}$$

3. Menentukan Posisi dari Fungsi Kecepatan

Berdasarkan persamaan (1.11) kecepatan dapat dicari dengan turunan dari fungsi posisinya. Sebaliknya, jika fungsi kecepatan diketahui, fungsi posisi dapat ditentukan dengan mengintegalkan fungsi kecepatan tersebut.

$$\mathbf{v} = \frac{d\mathbf{r}}{dt}$$

$$d\mathbf{r} = \mathbf{v}.dt$$

Apabila persamaan tersebut diintegalkan, maka:

$$\int d\mathbf{r} = \int \mathbf{v}.dt$$

$$\int_{\mathbf{r}_0}^{\mathbf{r}} d\mathbf{r} = \int_{t_0}^t \mathbf{v}.dt$$

$$\mathbf{r} - \mathbf{r}_0 = \int_{t_0}^t \mathbf{v}.dt$$

$$\mathbf{r} = \mathbf{r}_0 + \int_{t_0}^t \mathbf{v}.dt \quad \text{..... (1.13)}$$

dengan:

\mathbf{r}_0 = posisi awal (m)

\mathbf{r} = posisi pada waktu t (m)

\mathbf{v} = kecepatan yang merupakan fungsi waktu (m/s)

Komponen posisi pada arah sumbu x dan sumbu y adalah:

$$x = x_0 + \int_{t_0}^t v_x . dt$$

$$y = y_0 + \int_{t_0}^t v_y . dt \quad \text{..... (1.14)}$$

Komet

Kolom mengingat

Rumus menentukan posisi

dari fungsi kecepatan:

$$\mathbf{v} = \mathbf{v}(t) = v_x \mathbf{i} + v_y \mathbf{j}$$

$$\mathbf{r} = \mathbf{r}_0 + \int \mathbf{v}.dt = x\mathbf{i} + y\mathbf{j}$$

$$\mathbf{r}_0 = x_0 \mathbf{i} + y_0 \mathbf{j}$$

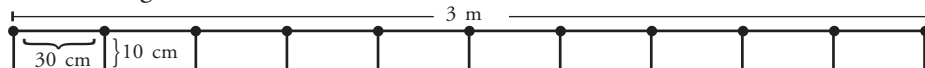
Kegiatan

Tujuan : Memeragakan metode yang digunakan para pelaut pertama untuk menentukan kecepatan kapal.

Alat dan bahan : Gunting, pensil, tali, penggaris, stopwatch.

Cara Kerja:

1. Potonglah tali sepanjang 3 m dan buatlah simpul di setiap ujungnya.
2. Potonglah sepuluh buah tali yang berukuran 10 cm.
3. Ikatlah satu potong tali pada setiap jarak 30 cm di sepanjang tali yang panjang. Ikatlah potongan-potongan tali tersebut dengan kuat sehingga tidak mudah bergeser.



4. Gulunglah tali yang panjang ke bagian tengah pensil.
5. Peganglah pensil dengan kedua tanganmu.
6. Mintalah kepada teman untuk memegang ujung tali yang tidak tergulung dan mulailah menghitung waktunya menggunakan stopwatch.

7. Ketika temanmu berkata 'mulai' dengan perlahan mulailah berjalan mundur, biarkanlah gulungan tali terbuka, dan hitunglah simpul yang melewati ibu jari dan jari tengahmu.
8. Berhentilah ketika temanmu berkata 'waktu sudah 2 menit'.
9. Gulunglah kembali tali ke pensil, ulangi kembali langkah ke-5 sampai ke-8. Akan tetapi kali ini berjalanlah secepat mungkin.
10. Bandingkan panjang tali yang tidak tergulung.

Diskusi:

Bagaimana hasilnya ketika kalian berjalan biasa dengan berjalan lebih cepat? Mengapa demikian?

Pelaut akhirnya menggunakan kata knot atau simpul untuk mengukur kecepatan kapal laut. Satu knot adalah 1 nautikal mil per jam. Adapun 1 nautikal mil sama dengan 6.076 kaki (= 1.823 m).

Contoh Soal

Sebuah benda bergerak sepanjang sumbu x dengan persamaan kecepatan $v = 2t - 2$, v dalam m/s dan t dalam s. Pada saat $t = 0$, posisi benda $x_0 = 3$ m, tentukan:

- a. persamaan posisi setiap waktu,
- b. jarak yang ditempuh benda setelah bergerak 5 sekon pertama!

Penyelesaian:

Diketahui: $v = (2t - 2)$ m/s
 $t_0 = 0 \rightarrow x_0 = 3$ m

Ditanyakan: a. $x = \dots$?
 b. $x_t = \dots$? ($t = 5$ s)

Jawab:

- a.
$$x = x_0 + \int_{t_0}^t v_x \cdot dt$$

$$= x_0 + \int_0^t (2t - 2) dt = x_0 + [t^2 - 2t]_0^t = 3 + [t^2 - 2t] = (t^2 - 2t + 3) \text{ m}$$
- b. untuk $t = 5$ s

$$x_t = (5)^2 - (2)(5) + 3 = (25 - 10 + 3) \text{ m} = 18 \text{ m}$$

Uji Kemampuan 1.2

Sebuah partikel bergerak di bidang datar dengan persamaan $x = 3t^2 + 3$ dan $y = 6t^2 + 3t$ (x dan y dalam meter dan t dalam sekon). Tentukan:

- a. koordinat titik pada $t = 2$ s,
- b. vektor perpindahan pada $t = 0$ sampai $t = 2$ s,
- c. vektor kecepatan rata-rata pada $t = 0$ sampai $t = 2$ s, dan
- d. besarnya kecepatan pada $t = 2$ s!



C. Percepatan

Percepatan adalah perubahan kecepatan per satuan waktu. Seperti kecepatan, percepatan juga merupakan besaran vektor.

1. Percepatan Rata-Rata

Percepatan rata-rata adalah perubahan kecepatan dibagi dengan waktu yang diperlukan untuk perubahan tersebut. Perhatikan Gambar 1.9. Pada saat t_1 , sebuah partikel berada di A dengan kecepatan sesaat \mathbf{v}_1 dan pada saat t_2 partikel berada di B dengan kecepatan sesaat \mathbf{v}_2 , percepatan rata-rata selama bergerak dari A ke B adalah:

$$\bar{\mathbf{a}} = \frac{\mathbf{v}_2 - \mathbf{v}_1}{t_2 - t_1} = \frac{\Delta \mathbf{v}}{\Delta t} \quad (1.15)$$

dengan:

$\bar{\mathbf{a}}$ = percepatan rata-rata (m/s^2)

$\Delta \mathbf{v}$ = perubahan kecepatan (m/s)

Δt = selang waktu (s)

Persamaan (1.15) jika diciptakan dalam vektor satuan, maka:

$$\begin{aligned} \bar{\mathbf{a}} &= \frac{\Delta v_x \mathbf{i} + \Delta v_y \mathbf{j}}{\Delta t} \\ &= \frac{\Delta v_x}{\Delta t} \mathbf{i} + \frac{\Delta v_y}{\Delta t} \mathbf{j} \\ \bar{\mathbf{a}} &= a_x \mathbf{i} + a_y \mathbf{j} \quad (1.16) \end{aligned}$$

dengan:

$$\begin{aligned} a_x &= \frac{\Delta v_x}{\Delta t} = \frac{v_{x2} - v_{x1}}{t_2 - t_1} \\ a_y &= \frac{\Delta v_y}{\Delta t} = \frac{v_{y2} - v_{y1}}{t_2 - t_1} \end{aligned}$$

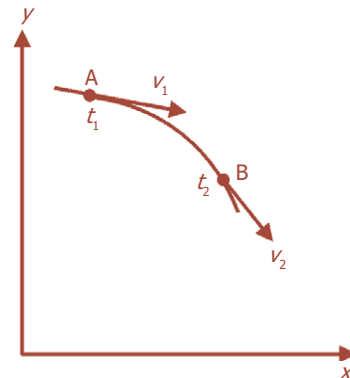
2. Percepatan Sesaat

Percepatan sesaat didefinisikan sebagai limit kecepatan rata-rata untuk interval waktu mendekati nol.

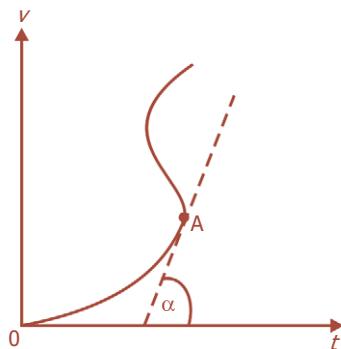
$$\bar{\mathbf{a}} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta \mathbf{v}}{\Delta t} = \frac{d\mathbf{v}}{dt} \quad (1.17)$$

Jika $\mathbf{v} = v_x \mathbf{i} + v_y \mathbf{j}$, maka:

$$\mathbf{a} = \frac{d(v_x \mathbf{i} + v_y \mathbf{j})}{dt}$$



Gambar 1.9 Percepatan rata-rata suatu benda yang bergerak dari A ke B.



Gambar 1.10 Percepatan sesaat merupakan kemiringan grafik kecepatan terhadap waktu.

$$\mathbf{a} = \frac{dv_x}{dt} \mathbf{i} + \frac{dv_y}{dt} \mathbf{j} \quad (1.18)$$

$$\mathbf{a} = a_x \mathbf{i} + a_y \mathbf{j}$$

dengan:

\mathbf{a} = vektor percepatan

$$a_x = \frac{dv_x}{dt}$$

$$a_y = \frac{dv_y}{dt}$$

Dari persamaan (1.18) dapat dikatakan bahwa percepatan merupakan turunan dari fungsi kecepatan terhadap waktu. Percepatan juga merupakan turunan kedua fungsi posisi terhadap waktu.

Karena $v_x = \frac{dx}{dt}$ dan $v_y = \frac{dy}{dt}$, maka persamaan (1.18) dapat dituliskan:

$$\mathbf{a} = \frac{d\left(\frac{dx}{dt}\right)}{dt} \mathbf{i} + \frac{d\left(\frac{dy}{dt}\right)}{dt} \mathbf{j}$$

$$\mathbf{a} = \frac{d^2x}{dt^2} \mathbf{i} + \frac{d^2y}{dt^2} \mathbf{j} \quad (1.19)$$

Sehingga percepatan sesaat menjadi:

$$\mathbf{a} = \frac{d\mathbf{v}}{dt} = \frac{d^2\mathbf{r}}{dt^2}$$

$$a_x = \frac{dv_x}{dt} = \frac{d^2x}{dt^2}$$

$$a_y = \frac{dv_y}{dt} = \frac{d^2y}{dt^2} \quad (1.20)$$

Komet
Kolom mengingat

Rumus percepatan sesaat
 $\mathbf{v} = \mathbf{v}(t) = v_x \mathbf{i} + v_y \mathbf{j}$
 $\mathbf{a} = \frac{d\mathbf{v}}{dt} = a_x \mathbf{i} + a_y \mathbf{j}$

Contoh Soal

1. Sebuah partikel bergerak dengan persamaan kecepatan $\mathbf{v} = (3+4t)\mathbf{i} + (3t^2)\mathbf{j}$, \mathbf{v} dalam m/s dan t dalam s, tentukan:

- besar percepatan rata-rata dari $t = 0$ sampai $t = 2$ s,
- besar percepatan saat $t = 1$ s dan $t = 2$ s!

Penyelesaian:

- a. Percepatan rata-rata

$$t = 0 \text{ s} \rightarrow \mathbf{v}_0 = (3 + (4)(0))\mathbf{i} + 3(0)^2\mathbf{j} = 3\mathbf{i}$$

$$t = 2 \text{ s} \rightarrow \mathbf{v} = \mathbf{v}_2 = (3 + (4)(2))\mathbf{i} + 3(2)^2\mathbf{j} = 11\mathbf{i} + 12\mathbf{j}$$

$$\bar{\mathbf{a}} = \frac{\Delta \mathbf{v}}{\Delta t} = \frac{\mathbf{v}_2 - \mathbf{v}_0}{\Delta t} = \frac{(11-3)\mathbf{i} + 12\mathbf{j}}{2} = \frac{8\mathbf{i} + 12\mathbf{j}}{2} = 4\mathbf{i} + 6\mathbf{j}$$

Besarnya percepatan rata-rata:

$$\bar{a} = \sqrt{a_x^2 + a_y^2} = \sqrt{4^2 + 6^2} = \sqrt{16 + 36} = \sqrt{52} = 2\sqrt{13} \text{ m/s}$$

b. Percepatan sesaat

$$\mathbf{a} = \frac{dv_x}{dt} \mathbf{i} + \frac{dv_y}{dt} \mathbf{j}$$

$$\mathbf{a} = \frac{d(3+4t)}{dt} \mathbf{i} + \frac{d(3t^2)}{dt} \mathbf{j}$$

$$\mathbf{a} = 4\mathbf{i} + (6t)\mathbf{j}$$

Besarnya percepatan:

$$t = 1 \text{ s} \rightarrow \mathbf{a}_1 = 4\mathbf{i} + (6)(1)\mathbf{j}$$

$$a_1 = \sqrt{4^2 + 6^2} = \sqrt{52} = 2\sqrt{13} \text{ m/s}^2$$

Besarnya percepatan:

$$t = 2 \text{ s} \rightarrow \mathbf{a}_2 = 4\mathbf{i} + (6)(2)\mathbf{j} = 4\mathbf{i} + 12\mathbf{j}$$

$$a_2 = \sqrt{4^2 + 12^2} = \sqrt{16 + 144} = 4\sqrt{10} \text{ m/s}^2$$

2. Suatu partikel bergerak lurus dengan persamaan gerak $\mathbf{r} = t^3 - 2t^2 + 10t + 3$, \mathbf{r} dalam meter dan t dalam sekon. Tentukan:

a. kecepatan saat $t = 2$ sekon,

b. percepatan saat $t = 2$ sekon,

c. percepatan rata-rata untuk $t = 1$ s dan $t = 3$ s!

Penyelesaian:

$$\text{a. } \mathbf{v} = \frac{d\mathbf{r}}{dt} = 3t^2 - 4t + 10$$

$$t = 2 \text{ s} \rightarrow \mathbf{v} = 3(2)^2 - 4(2) + 10 = 12 - 8 + 10 = 14 \text{ m/s}$$

$$\text{b. } \mathbf{a} = \frac{d\mathbf{v}}{dt} = 6t - 4$$

$$t = 2 \text{ s} \rightarrow \mathbf{a} = (6)(2) - 4 = 8 \text{ m/s}^2$$

$$\text{c. } t = 1 \text{ s} \rightarrow \mathbf{v}_1 = (3)(1)^2 - (4)(1) + 10 = 9 \text{ m/s}$$

$$t = 3 \text{ s} \rightarrow \mathbf{v}_3 = (3)(3)^2 - (4)(3) + 10 = 25 \text{ m/s}$$

$$\mathbf{a} = \frac{\Delta \mathbf{v}}{\Delta t} = \frac{\mathbf{v}_3 - \mathbf{v}_1}{t_3 - t_1} = \frac{25 - 9}{3 - 1} = \frac{16}{2} = 8 \text{ m/s}^2$$

3. Menentukan Kecepatan dari fungsi Percepatan

Berdasarkan persamaan (1.17), maka:

$$\mathbf{a} = \frac{d\mathbf{v}}{dt} \rightarrow d\mathbf{v} = \mathbf{a} \cdot dt$$

Fungsi kecepatan dapat ditentukan dengan mengintegralkan fungsi percepatan tersebut.

$$\int d\mathbf{v} = \int \mathbf{a} \cdot dt$$

Apabila saat t_0 kecepatannya \mathbf{v}_0 dan pada saat t kecepatannya \mathbf{v} , maka batas-batas integralnya adalah:

$$\int_{\mathbf{v}_0}^{\mathbf{v}} d\mathbf{v} = \int_{t_0}^t \mathbf{a} \cdot dt$$

$$\mathbf{v} - \mathbf{v}_0 = \int_{t_0}^t \mathbf{a} \cdot dt$$



Komet

Kolom mengingat

Rumus kecepatan dari fungsi percepatan

$$\mathbf{a} = \mathbf{a}(t) = a_x \mathbf{i} + a_y \mathbf{j}$$

$$\mathbf{v} = \mathbf{v}_0 + \int \mathbf{a} \cdot dt = v_x \mathbf{i} + v_y \mathbf{j}$$

$$\mathbf{v}_0 = v_{0x} \mathbf{i} + v_{0y} \mathbf{j}$$

$$\mathbf{v} = \mathbf{v}_0 + \int_{t_0}^t \mathbf{a} dt \dots\dots\dots (1.21)$$

dengan:

\mathbf{v}_0 = kecepatan awal, pada saat t_0 (m/s)

\mathbf{v} = kecepatan pada saat t (m/s)

\mathbf{a} = percepatan yang merupakan fungsi waktu (m/s²)

Apabila vektor kecepatan dan percepatan dinyatakan dalam komponen-komponennya, maka:

$$\begin{aligned} v_x &= v_{0x} + \int_{t_0}^t a_x dt \\ v_y &= v_{0y} + \int_{t_0}^t a_y dt \dots\dots\dots (1.22) \end{aligned}$$

Contoh Soal

1. Partikel bergerak lurus dengan persamaan percepatan $\mathbf{a} = 3\mathbf{i} + (4t)\mathbf{j}$, \mathbf{a} dalam m/s² dan t dalam s. Jika kecepatan awal partikel $\mathbf{v}_0 = 2\mathbf{i} + 3\mathbf{j}$, tentukan persamaan kecepatan partikel tersebut!

Penyelesaian:

Diketahui: $\mathbf{a} = 3\mathbf{i} + (4t)\mathbf{j}$

$\mathbf{v}_0 = 2\mathbf{i} + 3\mathbf{j}$

Ditanya: $\mathbf{v} = \dots ?$

Jawab:

$$\begin{aligned} \mathbf{v} &= \mathbf{v}_0 + \int_0^t \mathbf{a} dt = (2\mathbf{i} + 3\mathbf{j}) + \int_0^t (3\mathbf{i} + (4t)\mathbf{j}) dt \\ &= 2\mathbf{i} + 3\mathbf{j} + (3t)\mathbf{i} + (2t^2)\mathbf{j} = (2 + 3t)\mathbf{i} + (3 + 2t^2)\mathbf{j} \end{aligned}$$

Jadi, persamaan kecepatannya $\mathbf{v} = (2 + 3t)\mathbf{i} + (3 + 2t^2)\mathbf{j}$

2. Sebuah benda bergerak lurus dengan persamaan percepatan $\mathbf{a} = 2 + 4t$, \mathbf{a} dalam m/s² dan t dalam sekon. Jika kecepatan awal dan posisi awal benda masing-masing 2 m/s dan 5 m, tentukan:
 - a. persamaaan kecepatan,
 - b. posisi benda saat $t = 3$ s!

Penyelesaian:

Diketahui: $\mathbf{a} = 2 + 4t$

$\mathbf{v}_0 = 2$ m/s

$\mathbf{r}_0 = 5$ m

Ditanya: a. $\mathbf{v} = \dots ?$

b. $\mathbf{r} = \dots ?$

Jawab:

$$\begin{aligned} \text{a. } \mathbf{v} &= \mathbf{v}_0 + \int_0^t \mathbf{a} dt = 2 + \int_0^t (2 + 4t) dt \\ &= 2 + 2t + 2t^2 \end{aligned}$$

Jadi, persamaan kecepatannya adalah $\mathbf{v} = (2 + 2t + 2t^2)$ m/s

$$\begin{aligned} \text{b. } \mathbf{r} &= \mathbf{r}_0 + \int_0^t \mathbf{v} dt = 5 + \int_0^t (2 + 2t + 2t^2) dt = 5 + 2t + t^2 + \frac{2}{3}t^3 \\ &\text{atau} \\ \mathbf{r} &= \frac{2}{3}t^3 + t^2 + 2t + 5 \\ &\text{Pada saat } t = 3 \text{ sekon, maka:} \\ \mathbf{r} &= \frac{2}{3}(3^3) + 3^2 + 2(3) + 5 = 18 + 9 + 6 + 5 = 38 \text{ m} \end{aligned}$$

Uji Kemampuan 1.3

- Sebuah materi bergerak dengan kecepatan yang ditentukan oleh persamaan $\mathbf{v}_x = 2t^2 + 4$ dan $\mathbf{v}_y = 3t^2$, \mathbf{v} dalam m/s dan t dalam s. Tentukan:
 - besar percepatan rata-rata dari $t = 0$ sampai $t = 2$ s,
 - besar percepatan saat $t = 1$ s!
- Sebuah benda bergerak dengan percepatan yang ditentukan oleh persamaan $\mathbf{a} = 3t + 6$, \mathbf{a} dalam m/s² dan t dalam s. Jika kecepatan awal 3 m/s dan posisi awal 3 m, tentukan:
 - besar kecepatan saat $t = 2$ s,
 - posisi benda saat $t = 1$ s!



D. Gerak Lurus

Gerak lurus berubah beraturan merupakan gerak dengan percepatan konstan. Selama geraknya percepatan \mathbf{a} tidak berubah baik besar maupun arahnya, karena itu komponen-komponen \mathbf{a} juga tidak berubah, \mathbf{a}_x konstan dan \mathbf{a}_y konstan. Dengan demikian, kita memiliki suatu keadaan yang dapat dinyatakan sebagai jumlah dari dua komponen gerak pada dua arah yang berbeda, masing-masing dengan percepatan konstan dan terjadi secara serempak.

Persamaan untuk percepatan konstan dapat kalian lihat pada Tabel 1.1, diterapkan untuk komponen x dan y dari vektor posisi \mathbf{r} , vektor kecepatan \mathbf{v} , dan vektor percepatan \mathbf{a} .

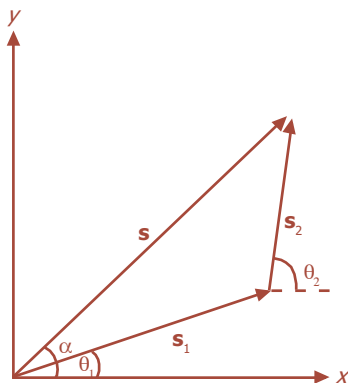


Sumber: *Encarta Encyclopedia*, 2006

Gambar 1.11 Kereta api melakukan gerak lurus berubah beraturan.

Tabel 1.1 Persamaan-persamaan untuk percepatan konstan

Persamaan gerak dalam arah x	Persamaan gerak dalam arah y
$\mathbf{v}_x = \mathbf{v}_{0x} + \mathbf{a}_x t$	$\mathbf{v}_y = \mathbf{v}_{0y} + \mathbf{a}_y t$
$x = x_0 + \frac{1}{2}(\mathbf{v}_{0x} + \mathbf{v}_x)t$	$y = y_0 + \frac{1}{2}(\mathbf{v}_{0y} + \mathbf{v}_y)t$
$x = x_0 + \mathbf{v}_{0x}t + \frac{1}{2}\mathbf{a}_x t^2$	$y = y_0 + \mathbf{v}_{0y}t + \frac{1}{2}\mathbf{a}_y t^2$
$\mathbf{v}_x^2 = \mathbf{v}_{0x}^2 + 2\mathbf{a}_x(x - x_0)$	$\mathbf{v}_y^2 = \mathbf{v}_{0y}^2 + 2\mathbf{a}_y(y - y_0)$



Gambar 1.12 Resultan vektor perpindahan.

Apabila gerak lurus yang terjadi merupakan perpaduan beberapa gerak maka dinyatakan dalam vektor resultan. Perpindahannya berdasarkan analisis komponen-komponen vektornya pada sumbu x dan y .

Vektor resultan s dapat dinyatakan ke dalam vektor s_1 dan s_2 sebagai berikut:

$$s = s_1 + s_2$$

Kita dapat menuliskan besar komponen-komponen berikut:

$$\begin{aligned} s_{1x} &= s_1 \cdot \cos \theta_1 & s_{1y} &= s_1 \cdot \sin \theta_1 \\ s_{2x} &= s_2 \cdot \cos \theta_2 & s_{2y} &= s_2 \cdot \sin \theta_2 \end{aligned}$$

sehingga:

$$\begin{aligned} s_x &= s_{1x} + s_{2x} = s_1 \cos \theta_1 + s_2 \cos \theta_2 \\ s_y &= s_{1y} + s_{2y} = s_1 \sin \theta_1 + s_2 \sin \theta_2 \end{aligned}$$

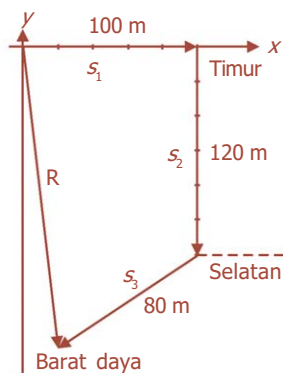
Besar vektor resultan dinyatakan:

$$s = \sqrt{s_x^2 + s_y^2} \dots\dots\dots (1.23)$$

Contoh Soal

Seorang tukang sayur berjalan sejauh 100 m ke Timur kemudian berbelok ke Selatan sejauh 120 m, dan ke Barat Daya sejauh 80 m. Hitunglah besar dan arah perpindahannya!

Penyelesaian:



Komponen y :

$$\begin{aligned} s_{1y} &= s_1 \cdot \sin \theta_1 = (100)(\sin 0^\circ) = 0 \\ s_{2y} &= s_2 \cdot \sin \theta_2 = (120)(\sin(-90^\circ)) = -120 \\ s_{3y} &= s_3 \cdot \sin \theta_3 = (80)(\sin 135^\circ) = 56,6 \\ s_y &= -120 + 56,6 = -63,4 \end{aligned}$$

Komponen x :

$$\begin{aligned} s_{1x} &= s_1 \cdot \cos \theta_1 = (100)(\cos 0^\circ) = 100 \\ s_{2x} &= s_2 \cdot \cos \theta_2 = (120)(\cos(-90^\circ)) = 0 \\ s_{3x} &= s_3 \cdot \cos \theta_3 = (80)(\cos 135^\circ) = -56,6 \\ s_x &= 100 + 0 - 56,6 = 43,4 \end{aligned}$$

Besar perpindahan:

$$s = \sqrt{s_x^2 + s_y^2} = \sqrt{(43,4)^2 + (-63,4)^2} = 76,83 \text{ m}$$

Arah perpindahan:

$$\alpha = \arctan \frac{s_y}{s_x} = \arctan \left(-\frac{63,4}{43,4} \right) = -55,6^\circ \text{ (searah jarum jam dari Timur)}$$

Uji Kemampuan 1.4

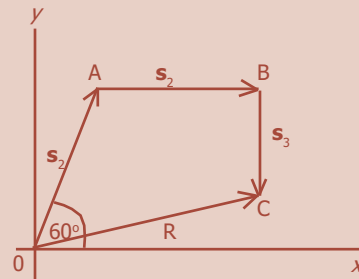
Sebuah bus dengan rute perjalanan melalui tiga kali persinggahan seperti ditunjukkan gambar di samping.

OA = 40 km

AB = 30 km

BC = 20 km

Berapakah besar dan arah perpindahannya?



E. Gerak Parabola

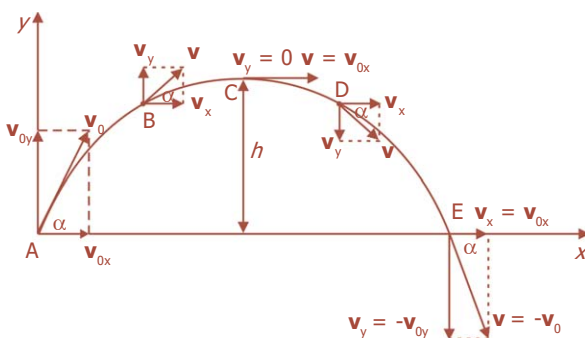
Perhatikan Gambar 1.13. Bagaimana lintasan yang ditempuh atlet tersebut? Atlet menempuh lintasan parabola (melengkung). Gerak parabola merupakan perpaduan gerak lurus beraturan (GLB) pada arah horizontal dengan gerak lurus berubah beraturan (GLBB) pada arah vertikal. Gerak parabola juga dikenal dengan gerak peluru. Lemparan bola, bola yang ditendang, peluru yang ditembakkan dari senapan, atlet yang melakukan lompat jauh atau lompat tinggi, merupakan contoh gerak parabola. Pada pembahasan ini kita mengabaikan gesekan udara, dan tidak akan memperhitungkan dengan proses bagaimana benda dilemparkan, tetapi hanya memerhatikan gerakanya setelah dilempar dan bergerak bebas di udara dengan pengaruh gravitasi semata. Oleh karena itu, percepatan benda tersebut disebabkan oleh percepatan gravitasi (g) yang arahnya ke bawah (menuju pusat Bumi).



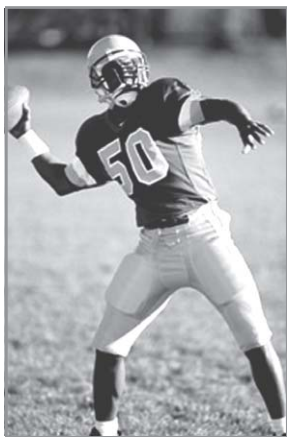
Sumber: *Ensiklopedi Umum untuk Pelajar Jilid 1*, PT Ichtiar Baru van Hoeve, 2005

Gambar 1.13 Atlet yang melakukan lompat tinggi.

Perhatikan Gambar 1.14. Sebuah benda mula-mula berada di pusat koordinat, dilemparkan ke atas dengan kecepatan v_0 dan sudut elevasi α . Pada arah sumbu x , benda bergerak dengan kecepatan konstan, atau percepatan nol ($a = 0$), sehingga komponen kecepatan v_x mempunyai besar yang sama pada setiap titik lintasan tersebut, yaitu sama dengan nilai awalnya v_{0x} pada sumbu y , benda mengalami percepatan gravitasi g .



Gambar 1.14 Lintasan gerak peluru.



Sumber: CD ClipArt

Gambar 1.15 Bola yang dilempar membentuk lintasan parabola.

BETA[®] Berita Fisika

Gerak parabola merupakan perpaduan dari gerak lurus beraturan yang mengarah horizontal dan gerak lurus berubah beraturan yang mengarah vertikal.

Untuk menganalisis gerak peluru, kita tinjau gerak dalam arah sumbu x dan sumbu y .

1. Vektor kecepatan awal (titik A)

Komponen vektor kecepatan awal pada sumbu x dan y adalah:

$$v_{0x} = v_0 \cdot \cos \alpha \quad (1.24)$$

$$v_{0y} = v_0 \cdot \sin \alpha$$

2. Kecepatan benda setiap saat (titik B).

Pada arah sumbu x (GLB)

$$v_x = v_{0x} = v_0 \cdot \cos \alpha \quad (1.25)$$

Pada arah sumbu y (GLBB)

$$v_y = v_{0y} - gt$$

$$v_y = v_0 \cdot \sin \alpha - gt \quad (1.26)$$

Besarnya kecepatan adalah:

$$v = \sqrt{v_x^2 + v_y^2}$$

3. Posisi benda setiap saat

- Pada arah sumbu x

$$x = v_{0x} \cdot t$$

$$x = v_0 \cdot \cos \alpha \cdot t \quad (1.27a)$$

- Pada arah sumbu y

$$y = v_{0y} \cdot t - \frac{1}{2} gt^2$$

$$y = v_0 \cdot \sin \alpha \cdot t - \frac{1}{2} gt^2 \quad (1.27b)$$

4. Tinggi maksimum benda (h)

Pada saat benda mencapai ketinggian maksimum, misalnya, di titik C kecepatan arah vertikal sama dengan 0.

$$v_y = 0$$

$$v_0 \cdot \sin \alpha - gt = 0$$

$$v_0 \cdot \sin \alpha = g \cdot t$$

$$t = \frac{v_0 \cdot \sin \alpha}{g} \quad (1.28)$$

dengan t adalah waktu untuk mencapai ketinggian maksimum. Jika t kita substitusikan ke persamaan (1.27b), maka:

$$y = v_0 \cdot \sin \alpha \left(\frac{v_0 \cdot \sin \alpha}{g} \right) - \frac{1}{2} g \left(\frac{v_0 \cdot \sin \alpha}{g} \right)^2$$

$$y = \frac{v_0^2 \cdot \sin^2 \alpha}{g} - \frac{v_0^2 \cdot \sin^2 \alpha}{2g} = \frac{v_0^2 \cdot \sin^2 \alpha}{2g}$$

$$h = \frac{v_0^2 \cdot \sin^2 \alpha}{2g} = \frac{(v_0 \cdot \sin \alpha)^2}{2g} \quad (1.29)$$

$$h = \text{tinggi maksimum}$$

5. Jarak jangkauan benda (R)

Pada saat benda menyentuh tanah, misalnya di titik E, posisi vertikal benda adalah nol.

$$\begin{aligned} y &= 0 \\ y &= v_0 \sin \alpha \cdot t - \frac{1}{2} g \cdot t^2 \\ 0 &= v_0 \sin \alpha \cdot t - \frac{1}{2} g \cdot t^2 \\ \frac{1}{2} g \cdot t^2 &= v_0 \sin \alpha \cdot t \\ t_R &= \frac{2v_0 \sin \alpha}{g} \dots\dots\dots (1.30) \end{aligned}$$

dengan t_R adalah waktu yang diperlukan benda untuk menyentuh tanah.

Jika persamaan (1.30) kita substitusikan ke persamaan (1.27a), maka:

$$\begin{aligned} x &= v_0 \cos \alpha \cdot t = R \\ R &= (v_0 \cos \alpha) \left(\frac{2v_0 \sin \alpha}{g} \right) \\ &= \frac{v_0^2 \cdot 2 \sin \alpha \cdot \cos \alpha}{g} ; \text{ dengan } 2 \sin \alpha \cdot \cos \alpha = \sin 2\alpha \end{aligned}$$

$$R = \frac{v_0^2 \cdot \sin 2\alpha}{g} \dots\dots\dots (1.31)$$

Berdasarkan persamaan (1.31), jarak jangkauan benda ditentukan oleh sudut elevasi (α). Benda akan mencapai jarak jangkauan maksimum jika nilai $\sin 2\alpha$ maksimum.

$$\begin{aligned} R &= \frac{v_0^2 \cdot \sin 2\alpha}{g}, R \text{ maksimum jika } \sin 2\alpha \text{ maksimum} \\ \sin 2\alpha &= 1 \\ \sin 2\alpha &= \sin 90^\circ \\ \alpha &= 45^\circ \end{aligned}$$

Komet
Kolom mengingat

Pada gerak parabola berlaku:
 $v_x = v_0 \cos \alpha$
 $v_y = v_0 \sin \alpha - gt$
 $x = v_0 \cos \alpha \cdot t$
 $y = v_0 \sin \alpha \cdot t - \frac{1}{2} gt^2$
 $h = \frac{v_0^2 \sin^2 \alpha}{2g}$
 $R = \frac{v_0^2 \sin 2\alpha}{g}$

Contoh Soal

- Sebuah peluru ditembakkan dengan kecepatan awal 40 m/s dan sudut elevasi 30° . Tentukan tinggi maksimum dan jarak jangkauan peluru ($g = 10 \text{ m/s}^2$)!

Penyelesaian:

Diketahui: $v_0 = 40 \text{ m/s}$; $\alpha = 30^\circ$; $g = 10 \text{ m/s}^2$

Ditanya: $h = \dots ?$ $R = \dots ?$

Jawab:

$$h = \frac{(v_0 \sin \alpha)^2}{2g} = \frac{(40 \sin 30^\circ)^2}{2g} = \frac{(40 \cdot \frac{1}{2})^2}{20} = 20 \text{ m}$$

$$R = \frac{v_0^2 \sin 2\alpha}{g} = \frac{(40)^2 \sin 2 \cdot 30^\circ}{10} = \frac{1600 \cdot \frac{1}{2} \sqrt{3}}{10} = 80\sqrt{3} \text{ m}$$

2. Sebuah benda dijatuhkan dari pesawat terbang yang bergerak horizontal dengan kelajuan 360 km/jam pada ketinggian 500 m. Tentukan jarak horizontal jatuhnya benda tersebut!

Penyelesaian:

Diketahui: $v_0 = 360 \text{ km/jam} = 100 \text{ m/s}$

$y = 500 \text{ m}$

$\alpha = 0^\circ$ (horizontal)

Ditanyakan: $R = \dots ?$

Jawab:

$$y = v_0 \cdot \sin \alpha \cdot t - \frac{1}{2} g t^2, \text{ karena } \alpha = 0^\circ, \text{ maka:}$$

$$y = -\frac{1}{2} g t^2$$

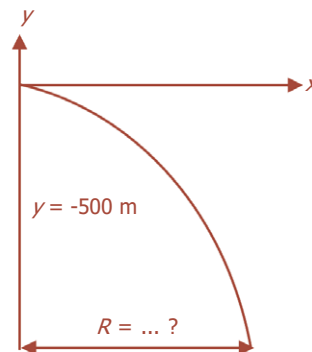
$$-500 = -\frac{1}{2} \cdot 10 \cdot t^2$$

$$t^2 = 100$$

$$t = 10 \text{ sekon}$$

Pada arah horizontal

$$R = v_0 \cdot \cos \alpha \cdot t = 100 \cdot \cos 0^\circ \cdot 10 = 1.000 \text{ m}$$

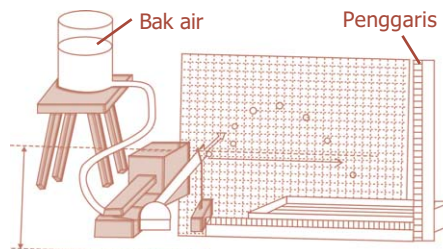


Kegiatan

Tujuan : Melakukan percobaan gerak parabola dengan semburan air.
 Alat dan bahan : Bak air, selang, penyangga selang, busur derajat, penggaris, pegas per, bak penampung, dan kertas grafik.

Cara Kerja:

1. Susunlah alat dan bahan seperti gambar di samping.
2. Arahkan ujung selang pada penyangga dengan arah sudut α .
3. Isilah bak dengan air secukupnya, dan getarkan elektromagnetik sehingga aliran air sesuai getaran pegas.
4. Pada air ketinggian h terhadap moncong pipa, lihatlah titik tertinggi pancaran air y , demikian juga pancaran terjauhnya x .
5. Ulangilah langkah-langkah di atas dengan sudut pancaran yang berbeda-beda.
6. Ulangilah langkah-langkah di atas dengan ketinggian air h yang berbeda-beda.
7. Catatlah hasil percobaan dengan mengikuti format berikut ini.



α	h (m)	$v_0 = \sqrt{2gh}$	x (m)	y (m)	$v_0 = \frac{1}{2} \times \sqrt{2} \frac{g}{y}$

Diskusi:

1. Bagaimana cara untuk menghitung tinggi maksimum dan jarak tembak mendatar dari gerak parabola?
2. Tulislah kesimpulan dari percobaan yang telah kalian lakukan!

Uji Kemampuan 1.5

Peluru ditembakkan dengan kecepatan awal 20 m/s dan sudut elevasi 45° . Tentukan tinggi maksimum dan jarak jangkauan terjauh peluru tersebut! ($g = 10 \text{ m/s}^2$)



F. Gerak Melingkar

Dalam bab ini kita akan mempelajari mengenai posisi sudut, kecepatan sudut, dan percepatan sudut sebagai persamaan fungsi terhadap waktu. Secara berturut-turut dinyatakan $\theta(t)$, $\omega(t)$, dan $\alpha(t)$.

1. Posisi Sudut

Posisi sudut dari suatu titik zat yang bergerak melingkar dinyatakan: $\theta = \theta(t)$, $\theta(t)$ merupakan fungsi dari waktu.

2. Kecepatan sudut

Kecepatan sudut rata-rata adalah hasil bagi perubahan posisi sudut dengan selang waktu tertentu (Gambar 1.16)

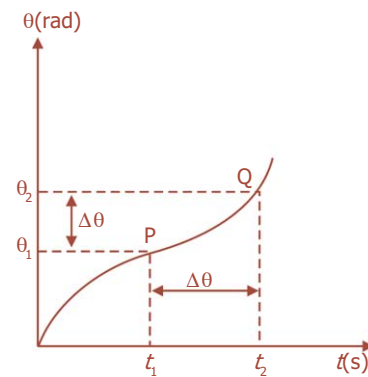
$$\bar{\omega} = \frac{\Delta\theta}{\Delta t} = \frac{\theta_2 - \theta_1}{t_2 - t_1} \dots\dots\dots (1.32)$$

Apabila selang waktu Δt mendekati nol, maka kecepatan benda tersebut adalah kecepatan sesaat, dirumuskan:

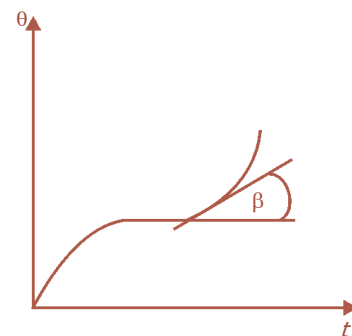
$$\begin{aligned} \omega &= \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta\theta}{\Delta t} \\ \omega &= \frac{d\theta}{dt} \dots\dots\dots (1.33) \end{aligned}$$

Kecepatan sudut sesaat merupakan turunan pertama dari fungsi posisi sudut terhadap waktu. Dalam sebuah grafik fungsi posisi sudut terhadap waktu ($\theta - t$), kecepatan sudut sesaat ditentukan dari kemiringan grafik tersebut (Gambar 1.17). Jika β adalah sudut kemiringan garis singgung grafik $\theta - t$, maka kecepatan sudut sesaat dituliskan:

$$\omega = \tan \beta \dots\dots\dots (1.34)$$



Gambar 1.16 Grafik posisi sudut terhadap waktu.



Gambar 1.17 Kemiringan grafik menunjukkan besarnya kecepatan sudut.



Sumber: *Jendela Iptek Teknologi*,
PT Balai Pustaka, 2000

Gambar 1.18 Semakin cepat kincir berputar maka kecepatan sudut semakin besar.

Posisi sudut dapat dicari dari fungsi kecepatan sudut sesaat. Apabila kecepatan sudut suatu benda diketahui, kita dapat menentukan fungsi posisi benda dengan mengintegalkan fungsi kecepatan sudut tersebut.

$$\omega = \frac{d\theta}{dt}$$

$$d\theta = \omega \cdot dt$$

$$\int d\theta = \int \omega \cdot dt$$

Jika pada saat $t = 0$ posisi sudut θ_0 dan pada saat $t = t$ posisi sudut θ , maka:

$$\int_{\theta_0}^{\theta} d\theta = \int_0^t \omega \cdot dt$$

$$\theta - \theta_0 = \int_0^t \omega \cdot dt$$

$$\theta = \theta_0 + \int_0^t \omega \cdot dt \dots\dots\dots (1.35)$$

dengan:

- θ_0 = posisi sudut awal (rad)
- θ = posisi sudut pada saat t (rad)
- ω = kecepatan sudut (rad/s)
- t = waktu (s)

3. Percepatan Sudut

Percepatan sudut rata-rata adalah perubahan kecepatan sudut tiap satuan waktu.

$$\bar{\alpha} = \frac{\Delta\omega}{\Delta t} = \frac{\omega_2 - \omega_1}{t_2 - t_1} \dots\dots\dots (1.36)$$

Jika selang waktu Δt mendekati nol, maka percepatan yang dimiliki benda adalah percepatan sesaat yang dirumuskan:

$$\bar{\alpha} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta\omega}{\Delta t}$$

$$\bar{\alpha} = \frac{d\omega}{dt} \dots\dots\dots (1.37)$$

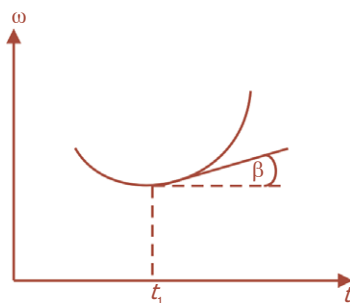
karena $\omega = \frac{d\theta}{dt}$, maka:

$$\alpha = \frac{d}{dt} \frac{d\theta}{dt} = \frac{d^2\theta}{dt^2} \dots\dots\dots (1.38)$$

Percepatan sudut merupakan turunan pertama fungsi kecepatan sudut atau turunan kedua dari fungsi posisi sudut.

Dalam sebuah grafik kecepatan sudut terhadap waktu ($\omega-t$), percepatan sudut ditentukan dari kemiringan grafik tersebut (Gambar 1.19). Jika β adalah sudut kemiringan garis singgung grafik $\omega-t$, maka percepatan sudut sesaat dituliskan:

$$\alpha = \tan \beta \dots\dots\dots (1.39)$$



Gambar 1.19 Kemiringan grafik menunjukkan besarnya percepatan sudut.

Kecepatan sudut dapat dicari dari fungsi percepatan sudut sesaat. Fungsi kecepatan sudutnya ditentukan dengan mengintegrasikan fungsi percepatan sudut tersebut.

$$\begin{aligned}\alpha &= \frac{d\omega}{dt} \\ d\omega &= \alpha \cdot dt \\ \int d\omega &= \alpha \cdot dt\end{aligned}$$

Jika pada saat $t = 0$ kecepatan sudutnya ω_0 dan pada saat $t = t$ kecepatan sudutnya ω , maka:

$$\begin{aligned}\int_{\omega_0}^{\omega} d\omega &= \int_0^t \alpha \cdot dt \\ \omega - \omega_0 &= \int_0^t \alpha \cdot dt\end{aligned}$$

$$\omega_t = \omega_0 + \int_0^t \alpha \cdot dt \quad \dots\dots\dots (1.40)$$

dengan:

- ω_0 = kecepatan sudut awal (rad/s)
- ω_t = kecepatan sudut pada saat t (rad/s)
- α = percepatan sudut (rad/s²)
- t = waktu

Contoh Soal

1. Sebuah titik pada roda berotasi dengan persamaan posisi sudut $\theta = 2 + 2t^2 + t^3$, θ dalam radian dan t dalam sekon. Tentukan:
 - a. posisi sudut titik tersebut pada saat $t = 2$ s,
 - b. kecepatan sudut rata-rata dari $t = 0$ sampai $t = 3$ s, dan
 - c. kecepatan sudut pada saat $t = 2$ s!

Penyelesaian:

- a. Posisi sudut

$$\begin{aligned}\theta &= 2 + 2t^2 + t^3 \\ t &= 2 \text{ s} \rightarrow \theta = 2 + (2)(2)^2 + 2^3 = 18 \text{ rad}\end{aligned}$$

- b. Kecepatan sudut rata-rata

$$\begin{aligned}t &= 0 \rightarrow \theta_0 = 2 \text{ rad} \\ t &= 3 \rightarrow \theta_3 = 2 + (2)(3) + 3^3 = 35 \text{ rad}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\bar{\omega} &= \frac{\Delta\theta}{\Delta t} = \frac{\theta_3 - \theta_0}{t_3 - t_0} \\ &= \frac{35 - 2}{3 - 0} = \frac{33}{3} = 11 \text{ rad/s}\end{aligned}$$

- c. Kecepatan sudut sesaat

$$\begin{aligned}\omega &= \frac{d\theta}{dt} = \frac{d}{dt}(2 + 2t^2 + t^3) = 4t + 3t^2 \\ t &= 2 \text{ s} \rightarrow \omega = (4)(2) + (3)(2)^2 = 20 \text{ rad/s}\end{aligned}$$

2. Sebuah benda mula-mula diam, kemudian berotasi dengan persamaan percepatan sudut $\alpha = (6t^2 + 12t)$ rad/s². Tentukan:

- kecepatan sudut pada saat $t = 2$ s (jika kecepatan awal sudut 0 rad/s),
- persamaan posisi sudut benda jika saat $t = 2$ s posisi sudutnya $\theta = 2$ rad!

Penyelesaian:

Persamaan percepatan sudut: $\alpha = 6t^2 + 12t$

- Kecepatan sudut

$$\begin{aligned}\omega_t &= \omega_0 + \int_0^t \alpha dt \\ &= \int (6t^2 + 12t) dt = 2t^3 + 6t^2\end{aligned}$$

$$\text{untuk } t = 2 \rightarrow \omega_t = (2)(2)^3 + (6)(2)^2 = 40 \text{ rad/s}$$

- Posisi sudut

$$\begin{aligned}\theta_t &= \theta_0 + \int \omega dt \\ \theta_t &= \theta_0 + \int (2t^3 + 6t^2) dt\end{aligned}$$

$$\theta_t = \theta_0 + \frac{1}{2}t^4 + 2t^3$$

untuk $t = 2$ s $\rightarrow \theta_t = 2$ rad, maka:

$$2 = \theta_0 + \frac{1}{2}(2)^4 + (2)(2)^3$$

$$2 = \theta_0 + 8 + 16$$

$$2 = \theta_0 + 24$$

$$\theta_0 = -22$$

$$\theta_t = (-22 + \frac{1}{2}t^4 + 2t^3) \text{ rad}$$



Sumber: *Jendela Iptek Gaya dan Gerak*, PT Balai Pustaka, 2000

Gambar 1.20 Permainan kincir ini melakukan gerak rotasi beraturan.

4. Kinematika Rotasi

a. Gerak Rotasi Beraturan

Gerak rotasi beraturan didefinisikan sebagai gerak rotasi dengan kecepatan sudut konstan atau percepatan sudut nol. Berdasarkan persamaan (1.35) diperoleh:

$$\theta_t = \theta_0 + \int \omega dt$$

Karena kecepatan sudut ω konstan, maka:

$$\begin{aligned}\theta_t &= \theta_0 + \omega \int_0^t dt \\ &= \theta_0 + \omega [t]_0^t = \theta_0 + \omega(t - 0)\end{aligned}$$

$$\theta_t = \theta_0 + \omega t \dots\dots\dots (1.41)$$

dengan:

θ_0 = posisi sudut awal (rad)

θ_t = posisi sudut pada saat t (rad)

ω = kecepatan sudut (rad/s)

t = waktu (s)

b. Gerak Rotasi Berubah Beraturan

Gerak rotasi berubah beraturan didefinisikan sebagai gerak rotasi dengan percepatan sudut konstan. Berdasarkan persamaan (1.40) diperoleh:

$$\omega_t = \omega_0 + \int_0^t \alpha \cdot dt$$

Karena percepatan sudut α konstan, maka:

$$\omega_t = \omega_0 + \alpha t \quad \text{..... (1.42)}$$

Posisi sudut θ dapat ditentukan dengan memasukkan persamaan (1.42) ke persamaan (1.35), sehingga:

$$\begin{aligned} \theta_t &= \theta_0 + \int_0^t \omega \cdot dt \\ &= \theta_0 + \int_0^t (\omega_0 + \alpha \cdot t) dt \\ \theta_t &= \theta_0 + \omega_0 \cdot t + \frac{1}{2} \alpha t^2 \quad \text{..... (1.43)} \end{aligned}$$

dengan:

θ_0 = posisi sudut awal (rad)

θ_t = posisi sudut pada saat t (rad)

ω_0 = kecepatan sudut awal (rad/s)

α = percepatan sudut (rad/s²)

t = waktu (s)



Sumber: Dokumen Penerbit, 2006

Gambar 1.21 Roda pada dokar melakukan gerak rotasi.

Contoh Soal

1. Sebuah benda dengan jari-jari 20 cm berotasi dengan percepatan sudut tetap 2 rad/s². Pada saat $t = 0$ s, kecepatan sudut dan posisi sudutnya masing-masing 5 rad/s dan 10 rad. Tentukan:
 - a. kecepatan sudut saat $t = 5$ s,
 - b. kecepatan linier saat $t = 5$ s,
 - c. posisi sudut saat $t = 3$ s, dan
 - d. panjang lintasan yang ditempuh selama 4 s!

Penyelesaian:

Diketahui: $R = 20 \text{ cm} = 0,2 \text{ m}$ $\omega_0 = 5 \text{ rad/s}$
 $\alpha = 2 \text{ rad/s}^2$ $\theta_0 = 10 \text{ rad}$

Ditanya: a. $\omega_t = \dots ? (t = 5 \text{ s})$ c. $\theta_t = \dots ? (t = 3 \text{ s})$
 b. $v = \dots ? (t = 5 \text{ s})$ d. $s = \dots ? (t = 4 \text{ s})$

Jawab:

- a. $\omega_t = \omega_0 + \alpha \cdot t = 5 + (2)(5) = 15 \text{ rad/s}$
- b. $v = \omega \cdot R = (15)(0,2) = 3 \text{ m/s}$
- c. $\theta_t = \theta_0 + \omega_0 \cdot t + \frac{1}{2} \alpha t^2 = 10 + (5)(5) + \frac{1}{2} (2)(5)^2 = 10 + 25 + 25 = 60 \text{ rad}$
- d. $s = \theta \cdot R = (60)(0,2) = 12 \text{ m}$

2. Sebuah roda berputar dengan kecepatan 300 putaran per menit, kemudian direm dan 5 sekon kemudian kecepatannya menjadi 60 putaran per menit. Tentukan sudut roda tersebut!

Penyelesaian:

Diketahui: $\omega_0 = 2\pi \frac{300}{60} = 10\pi \text{ rad/s}$ $\omega_t = 2\pi \frac{60}{60} = 2\pi \text{ rad/s}$
 $t = 5 \text{ s}$

Ditanya: $\alpha = \dots ?$

Jawab:

$$\omega_t = \omega_0 + \alpha \cdot t$$

$$2\pi = 10\pi + \alpha (5)$$

$$5\alpha = 2\pi - 10\pi$$

$$5\alpha = -8\pi$$

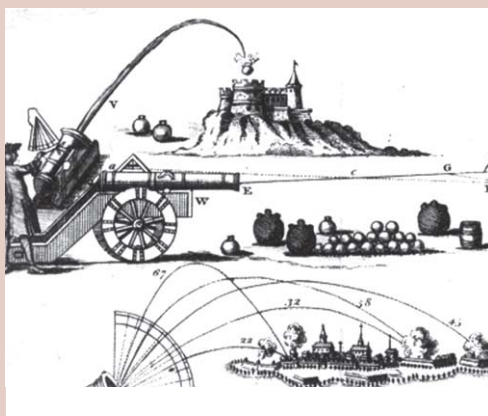
$$\alpha = -1,6\pi \text{ rad/s}^2$$

Uji Kemampuan 1.6

- Sebuah roda dengan jari-jari 25 cm berputar seperti tampak pada gambar di samping. Jika satu titik pada roda memiliki laju 5 m/s, berapa kecepatan roda berputar?
- Sebuah piringan (CD) berputar dengan posisi sudut $\theta = 6t^2 + 4t - 2$, t dalam sekon dan θ dalam radian. Tentukan:
 - kecepatan sudutnya saat $t = 0 \text{ s}$ dan $t = 2 \text{ s}$,
 - percepatan sudutnya!



Percikan Fisika



Jalur-Jalur Peluru

Jalur peluru-peluru meriam dalam gambar cetakan dari abad ke-18 di samping ditunjukkan sebagai parabola. Seperti yang dibuktikan Galileo. Gambar ini menunjukkan bahwa jarak maksimum dicapai ketika meriam dimiringkan 45° . Bahkan dewasa ini penembak meriam menggunakan perhitungan yang mirip dengan ini untuk mengkalkulasi ketinggian dan arah tembakan. Setiap faktor yang mungkin memengaruhi gerak peluru juga diperhitungkan, seperti jarak dengan sasaran, angin, suhu, tekanan udara, dan perputaran.

Fiesta

Fisikawan Kita



Augustin Louis Cauchy

Ia seorang ahli matematika yang mencetuskan analisis dan teori grup substitusi. Sumbangannya pada bidang matematika adalah dia memperjelas prinsip kalkulus yang saat ini dianggap penting untuk menganalisis. Ia juga menciptakan teorema integral Cauchy. Teorema integralnya sangat penting dalam masalah fisika dan rekayasa. Ia juga memberi gagasan yang teliti tentang limit pada tahun 1821.

Kilas Balik

- ✱ Dalam koordinat kartesius, sebuah vektor dapat dinyatakan dalam vektor-vektor satuan \mathbf{i} , \mathbf{j} , dan \mathbf{k} .

\mathbf{i} , vektor satuan pada arah sumbu x

\mathbf{j} , vektor satuan pada arah sumbu y

\mathbf{k} , vektor satuan pada arah sumbu z

- ✱ Vektor posisi suatu titik dapat dinyatakan dengan vektor satuan.

$$\mathbf{r} = x\mathbf{i} + y\mathbf{j}$$

$$|\mathbf{r}| = r = \sqrt{x^2 + y^2}$$

Arah \mathbf{r} terhadap sumbu x_+ dinyatakan:

$$\tan \alpha = \frac{y}{x}$$

- ✱ Kecepatan rata-rata dalam selang waktu tertentu adalah:

$$\bar{\mathbf{v}} = \frac{\Delta \mathbf{r}}{\Delta t} = \frac{\Delta x}{\Delta t} \mathbf{i} + \frac{\Delta y}{\Delta t} \mathbf{j}$$

- ✱ Kecepatan sesaat dinyatakan:

$$\mathbf{v} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta \mathbf{r}}{\Delta t} = \frac{d\mathbf{r}}{dt}$$

- ✱ Posisi benda dapat ditentukan dari fungsi kecepatannya, dengan metode integral

$$\mathbf{v} = \frac{d\mathbf{r}}{dt} \rightarrow d\mathbf{r} = \mathbf{v} \cdot dt$$

$$\int_{r_0}^r d\mathbf{r} = \int_{t_0}^t \mathbf{v} dt \rightarrow \mathbf{r} = \mathbf{r}_0 = \int_{t_0}^t \mathbf{v} dt \rightarrow \mathbf{r} = \mathbf{r}_0 + \int_{t_0}^t \mathbf{v} dt$$

- ✱ Percepatan rata-rata dalam selang waktu tertentu dituliskan:

$$\bar{\mathbf{a}} = \frac{\Delta \mathbf{v}}{\Delta t} = \frac{\Delta v_x}{\Delta t} \mathbf{i} + \frac{\Delta v_y}{\Delta t} \mathbf{j}$$

- ✳ Percepatan sesaat dinyatakan:

$$\bar{a} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta v}{\Delta t} = \frac{dv}{dt}$$

- ✳ Kecepatan dapat ditentukan dari fungsi percepatan dengan cara:

$$\bar{a} = \frac{dv}{dt} \rightarrow dv = a \cdot dt \rightarrow v = v_0 + \int_{t_0}^t a \cdot dt$$

- ✳ Gerak parabola merupakan perpaduan gerak lurus beraturan pada arah horizontal dengan gerak lurus berubah beraturan pada arah vertikal.

- ✳ Komponen kecepatan awal pada sumbu x dan sumbu y masing-masing adalah:

$$v_{0x} = v_0 \cos \alpha$$

$$v_{0y} = v_0 \sin \alpha$$

dengan α adalah sudut elevasi.

- ✳ Kecepatan benda setiap saat dinyatakan:

$$v_x = v_{0x} = v_0 \cdot \cos \alpha \text{ dan } v_y = v_0 \cdot \sin \alpha$$

$$v = \sqrt{v_x^2 + v_y^2}$$

- ✳ Koordinat posisi benda setiap saat adalah:

$$x = v_{0x} \cdot t = v_0 \cdot \cos \alpha \cdot t$$

$$y = v_{0y} \cdot t - \frac{1}{2} g \cdot t^2 = v_0 \cdot \sin \alpha \cdot t - \frac{1}{2} g \cdot t^2$$

- ✳ Tinggi maksimum yang dicapai benda (h) dirumuskan:

$$h = \frac{v_0^2 \cdot \sin^2 \alpha}{2g} = \frac{(v_0 \cdot \sin \alpha)^2}{2g}$$

- ✳ Jarak jangkauan benda pada arah mendatar, dinyatakan:

$$R = \frac{v_0 \cdot \sin 2\alpha}{g} ; \text{ dengan } \sin 2\alpha = 2 \sin \alpha \cdot \cos \alpha$$

- ✳ Posisi sudut suatu titik zat yang bergerak melingkar dinyatakan:

$$\theta = \theta(t) \rightarrow \text{fungsi dari waktu}$$

- ✳ Kecepatan sudut rata-rata dituliskan:

$$\bar{\omega} = \frac{\Delta \theta}{\Delta t} = \frac{\theta_2 - \theta_1}{t_2 - t_1}$$

- ✳ Kecepatan sudut sesaat dirumuskan:

$$\omega = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta \theta}{\Delta t} = \frac{d\theta}{dt}$$

- ✳ Posisi sudut dapat ditentukan dengan mengintegralkan kecepatan sudutnya

$$\theta = \theta_0 + \int_0^t \omega \cdot dt$$

- ✳ Percepatan sudut rata-rata:

$$\bar{\alpha} = \frac{\Delta \omega}{\Delta t} = \frac{\omega_2 - \omega_1}{t_2 - t_1}$$

✳ Percepatan sudut sesaat:

$$\alpha = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta \omega}{\Delta t} = \frac{d\omega}{dt}$$

✳ Kecepatan sudut dapat ditentukan dengan mengintegralkan percepatan sudutnya.

$$\omega_t = \omega_0 + \int_0^t \alpha \cdot dt$$

✳ Pada gerak rotasi beraturan, posisi sudut dinyatakan:

$$\theta_t = \theta_0 + \omega t$$

✳ Pada gerak rotasi berubah beraturan, kecepatan sudut dan posisi sudutnya adalah:

$$\omega_t = \omega_0 + \alpha t$$

$$\theta_t = \theta_0 + \omega_0 t + \frac{1}{2} \alpha t^2$$

Uji Kompetensi

A. Pilihlah jawaban yang paling tepat!

- Sebuah benda bergerak lurus sepanjang sumbu x dengan persamaan $\mathbf{r} = 2t^2 + 6t$, \mathbf{r} dalam meter dan t dalam sekon. Kecepatan benda setelah bergerak 5 sekon adalah
 - 26 m/s
 - 30 m/s
 - 40 m/s
 - 56 m/s
 - 80 m/s
- Benda bergerak pada arah sumbu x dengan kecepatan $\mathbf{v} = (2t + 8)\mathbf{i}$ m/s. Jika posisi awal benda tersebut adalah $\mathbf{r}_0 = -5\mathbf{i}$ m, maka posisi benda setelah bergerak adalah
 - $(2t^2 + 8t - 5)\mathbf{i}$ m
 - $(t^2 + 8t + 5)\mathbf{i}$ m
 - $(t^2 + 8t - 5)\mathbf{i}$ m
 - $(2t^2 - 5t)\mathbf{i}$ m
 - $(2t^2 - 8t - 5)\mathbf{i}$ m
- Suatu titik zat bergerak dengan persamaan posisi $\mathbf{r} = \left(\frac{2}{3}t^3 + 4t + 6\right)\mathbf{i} + \left(\frac{1}{2}t^3 + 3t\right)\mathbf{j}$, \mathbf{r} dalam meter. Kecepatan titik zat setelah 2 sekon adalah
 - 3 m/s
 - 9 m/s
 - 12 m/s
 - 15 m/s
 - 21 m/s

4. Sebuah partikel pada saat $t = 1$ s berada di P (2, 4) dan pada saat $t = 3$ s berada di Q (8, 12). Besarnya perpindahan dan kecepatan rata-rata partikel tersebut adalah
 - a. 5 m dan 10 m/s
 - b. 7 m dan 14 m/s
 - c. 8 m dan 10 m/s
 - d. 10 m dan 5 m/s
 - e. 14 m dan 7 m/s
5. Sebuah benda dilemparkan horizontal dari puncak menara yang tingginya 45 m dengan kecepatan 10 m/s. Jarak tempuh benda tersebut dalam arah mendatar dihitung dari kaki menara adalah ($g = 10 \text{ m/s}^2$)
 - a. 30 m
 - b. 45 m
 - c. 60 m
 - d. 90 m
 - e. 120 m
6. Peluru A dan B ditembakkan dari senapan yang sama dengan sudut elevasi berbeda. Peluru A dengan sudut 30° dan peluru B dengan sudut 60° . Perbandingan tinggi maksimum yang dicapai peluru A dengan peluru B adalah
 - a. 1 : 2
 - b. 1 : 3
 - c. 2 : 1
 - d. $1 : \sqrt{3}$
 - e. $\sqrt{3} : 1$
7. Sebuah bola golf dipukul dengan kecepatan 9,8 m/s membentuk sudut α terhadap horizontal. Bila $\sin \alpha = \frac{4}{5}$, $g = 9,8 \text{ m/s}^2$ dan lapangan golf datar, maka lama waktu yang diperlukan bola golf untuk sampai ke permukaan lapangan lagi adalah
 - a. 0,5 s
 - b. 1,5 s
 - c. 1,6 s
 - d. 1,7 s
 - e. 1,75 s
8. Sebuah benda berotasi dengan posisi sudut $\theta = t^2 + 2t + 5$, θ dalam rad dan t dalam sekon. Kecepatan rata-rata benda selama 5 detik pertama adalah
 - a. 3 rad/s
 - b. 5 rad/s
 - c. 7 rad/s
 - d. 8 rad/s
 - e. 10 rad/s
9. Partikel melakukan gerak rotasi dengan persamaan posisi sudut $\theta = t^3 - t^2 + 5$, θ dalam radian dan t dalam sekon. Percepatan sudut partikel tersebut saat $t = 2$ s adalah
 - a. 4 rad/s^2
 - b. 6 rad/s^2
 - c. 8 rad/s^2
 - d. 10 rad/s^2
 - e. 15 rad/s^2

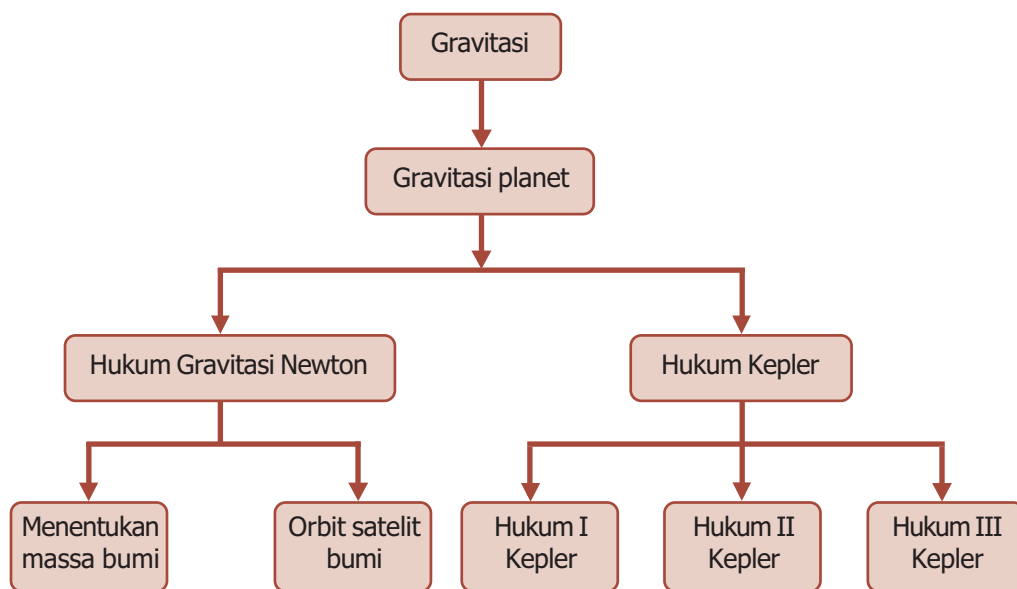
10. Sebuah benda bergerak rotasi dengan persamaan kecepatan sudut $\omega = 2t + 5$, ω dalam rad/s, t dalam sekon. Jika posisi sudut awal 10 rad, persamaan posisi sudutnya adalah
- $\theta = 2t^2 + 5t + 10$
 - $\theta = t^2 + 5t + 10$
 - $\theta = t^2 + 5t$
 - $\theta = 2t^2 + 5t$
 - $\theta = 10t^2 + 2t + 5$

B. Jawablah dengan singkat dan benar!

- Sebuah partikel bergerak lurus dengan persamaan $r = t^3 - 6t^2 + 4$, r dalam meter dan t dalam sekon. Tentukan:
 - posisi partikel mula-mula ($t = 0$),
 - kecepatan pada saat $t = 2$ s dan $t = 3$ s, dan
 - percepatan pada saat $t = 2$ s!
- Suatu titik zat bergerak sepanjang garis lurus dengan persamaan percepatan $a = (4t^3 - 3t^2 + 2)$ m/s², dengan kecepatan awal $v_0 = 4$ m/s. Hitunglah:
 - kecepatan setelah bergerak 2 sekon,
 - posisi benda pada saat $t = 2$ sekon!
- Peluru ditembakkan dari tanah mendatar dengan kecepatan awal 100 m/s dan sudut elevasi α ($\cos \alpha = \frac{3}{5}$). Jika $g = 10$ m/s², hitunglah:
 - posisi peluru setelah 2 sekon,
 - kecepatan peluru setelah 2 sekon,
 - tinggi maksimum peluru, dan
 - jarak tembakan mendatar!
- Sebuah benda bergerak rotasi dengan posisi sudut $\theta = (8t + 2t^2)$ rad, dengan t dalam sekon. Hitunglah:
 - kecepatan sudut awal,
 - kecepatan sudut pada saat $t = 5$ sekon, dan
 - kecepatan sudut rata-rata selama 5 sekon pertama!
- Benda bergerak rotasi dengan percepatan sudut 2 rad/s². Kecepatan awal dan posisi awal masing-masing 5 rad/s dan 10 rad. Hitunglah kecepatan sudut rata-rata selama 5 sekon pertama!

PETA KONSEP

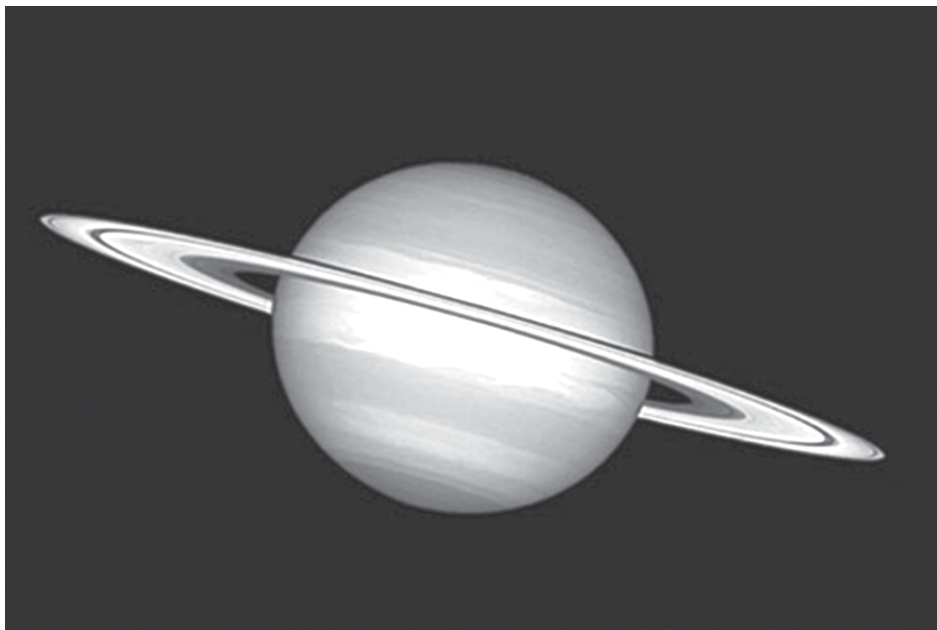
Bab 2 Gravitasi Planet dalam Sistem Tata Surya



BAB

2

GRAVITASI PLANET DALAM SISTEM TATA SURYA



- Planet dalam sistem tata surya beredar pada orbitnya karena gaya gravitasi.

Sumber: *Encarta Encyclopedia*, 2006

Pernahkah kalian memikirkan bagaimana benda-benda langit yang beredar pada orbitnya masing-masing tidak saling bertabrakan? Bagaimana pula kita dapat berjalan di tanah, tidak melayang-layang di udara seperti kertas terbang? Semua terjadi karena ada gaya gravitasi pada masing-masing benda tersebut.

Kata Kunci

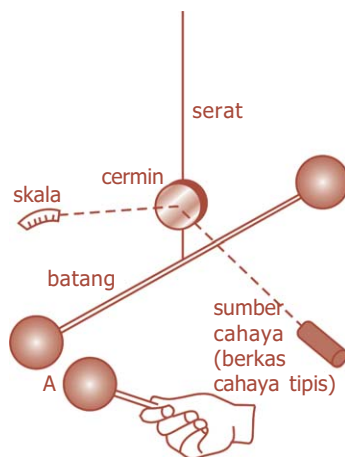
gerak, gravitasi,
orbit, percepatan,
periode, planet

Kalian tentu sering mendengar istilah gravitasi. Apa yang kalian ketahui tentang gravitasi? Apa pengaruhnya terhadap planet-planet dalam sistem tata surya? Gravitasi merupakan gejala adanya interaksi yang berupa tarik-menarik antara benda-benda yang ada di alam ini karena massanya. Konsepsi adanya gaya tarik-menarik atau dikenal dengan gaya gravitasi antara benda-benda di alam pertama kali dikemukakan oleh Sir Isaac Newton pada tahun 1665. Berdasarkan analisisnya, Newton menemukan bahwa gaya yang bekerja pada buah apel yang jatuh dari pohon dan gaya yang bekerja pada Bulan yang bergerak mengelilingi Bumi mempunyai sifat yang sama. Setiap benda pada permukaan bumi merasakan gaya gravitasi yang arahnya menuju pusat bumi. Gaya gravitasi bumi inilah yang menyebabkan buah apel jatuh dari pohon dan yang menahan Bulan pada orbitnya.

Pada bab ini kalian akan mempelajari interaksi gravitasi yang bersifat universal. Dalam pengertian, interaksi bekerja dengan cara yang sama di antara benda-benda di alam ini, antara Matahari dengan planet dan planet dengan satelitnya.



A. Hukum Gravitasi Newton



Gambar 2.1 Diagram skematik neraca Cavendish untuk menentukan nilai konstanta gravitasi G .

Ketika duduk di kelas X, kalian telah mempelajari hukum-hukum Newton. Salah satunya pada tahun 1687, Newton mengemukakan Hukum Gravitasi yang dapat dinyatakan berikut ini.

“Setiap benda di alam semesta menarik benda lain dengan gaya yang besarnya berbanding lurus dengan hasil kali massa-massanya dan berbanding terbalik dengan kuadrat jarak antara keduanya”.

Besarnya gaya gravitasi, secara matematis dituliskan:

$$F = G \frac{m_1 \cdot m_2}{r^2} \dots\dots\dots (2.1)$$

dengan:

- F = gaya gravitasi (N)
- m_1, m_2 = massa masing-masing benda (kg)
- r = jarak antara kedua benda (m)
- G = konstanta gravitasi ($\text{Nm}^2\text{kg}^{-2}$)

Nilai konstanta gravitasi G ditentukan dari hasil percobaan yang dilakukan oleh Henry Cavendish pada tahun 1798 dengan menggunakan peralatan tampak seperti pada Gambar 2.1.

Neraca Cavendish terdiri dari dua buah bola kecil bermassa m yang ditempatkan pada ujung-ujung sebuah batang horizontal yang ringan. Batang tersebut digantung di tengah-tengahnya dengan serat yang halus. Sebuah cermin kecil diletakkan pada serat penggantung yang memantulkan berkas cahaya ke sebuah mistar untuk mengamati puntiran serat. Dua bola besar bermassa M didekatkan pada bola kecil m . Adanya gaya gravitasi antara kedua bola tersebut menyebabkan serat terpuntir. Puntiran ini menggeser berkas cahaya pada mistar. Dengan mengukur gaya antara dua massa, serta massa masing-masing bola, Cavendish mendapatkan nilai G sebesar:

$$G = 6,67 \times 10^{-11} \text{ Nm}^2/\text{kg}^2$$

Penemuan gaya gravitasi diawali oleh ketertarikan Newton terhadap Bulan yang selalu mengelilingi Bumi. Saat duduk di bawah pohon apel, ia melihat sebuah apel jatuh dari pohon. Ia berpikir mengapa buah jatuh ke bawah.

Contoh Soal

1. Massa bumi adalah 6×10^{24} kg dan massa bulan adalah $7,4 \times 10^{22}$ kg. Apabila jarak rata-rata Bumi dengan Bulan adalah $3,8 \times 10^8$ m dan $G = 6,67 \times 10^{-11} \text{ Nm}^2/\text{kg}^2$, tentukan gaya gravitasi antara Bumi dengan Bulan!

Penyelesaian:

Diketahui: $M = 6 \times 10^{24} \text{ kg}$
 $m = 7,4 \times 10^{22} \text{ kg}$
 $R = 3,8 \times 10^8 \text{ m}$
 $G = 6,67 \times 10^{-11} \text{ Nm}^2/\text{kg}^2$

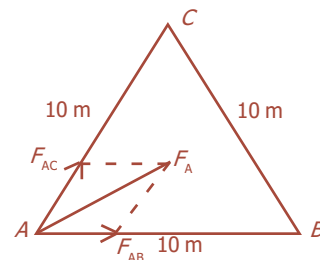
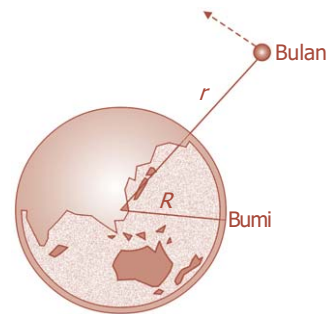
Ditanya: $F = \dots?$

Jawab:

$$\begin{aligned} F &= G \frac{M \cdot m}{r^2} \\ &= 6,67 \times 10^{-11} \frac{(6 \times 10^{24})(7,4 \times 10^{22})}{(3,8 \times 10^8)^2} \\ &= \frac{296,148 \times 10^{35}}{14,44 \times 10^{16}} \\ &= 2,05 \times 10^{20} \text{ N} \end{aligned}$$

2. Tiga buah benda A, B, C diletakkan seperti pada gambar.

Massa A, B, C berturut-turut 5 kg, 4 kg, dan 10 kg. Jika $G = 6,67 \times 10^{-11} \text{ Nm}^2/\text{kg}^2$, tentukan besarnya gaya gravitasi pada benda A akibat pengaruh benda B dan C!



Penyelesaian:

Diketahui: $m_A = 5 \text{ kg}$
 $m_B = 4 \text{ kg}$
 $m_C = 10 \text{ kg}$
 $r_{AB} = r_{AC} = r_{BC} = 10 \text{ m}$
 $G = 6,67 \times 10^{-11} \text{ Nm}^2/\text{kg}^2$

Ditanya: $F_A = \dots?$

Jawab:

$$F_{AB} = G \frac{m_A \cdot m_B}{r_{AB}^2} = 6,67 \times 10^{-11} \frac{5 \times 4}{10^2} = 1,33 \times 10^{-11} \text{ N}$$

$$F_{AC} = G \frac{m_A \cdot m_C}{r_{AC}^2} = 6,67 \times 10^{-11} \frac{5 \times 10}{10^2} = 3,34 \times 10^{-11} \text{ N}$$

$$\begin{aligned} F_A &= \sqrt{F_{AB}^2 + F_{AC}^2 + 2F_{AB} \cdot F_{AC} \cos \alpha} \\ &= \sqrt{(1,33 \times 10^{-11})^2 + (3,34 \times 10^{-11})^2 + (2 \times 1,33 \times 10^{-11} \times 3,34 \times 10^{-11} \times \cos 60^\circ)} \\ &= 4,17 \times 10^{-11} \text{ N} \end{aligned}$$

Uji Kemampuan 2.1

Andri bermassa 50 kg berada di Bumi. Jika massa bulan $7,4 \times 10^{22} \text{ kg}$, massa matahari $2,0 \times 10^{30} \text{ kg}$, jarak Bumi ke Bulan $3,8 \times 10^8 \text{ m}$, dan jarak Bumi ke Matahari $1,5 \times 10^{11} \text{ m}$, tentukan:

- gaya tarik bulan,
- gaya tarik matahari!



B. Percepatan Gravitasi



Alat untuk mengukur gaya gravitasi pada permukaan bumi adalah gravimeter. Alat ini biasanya digunakan untuk eksplorasi minyak bumi.

Percepatan gravitasi adalah percepatan suatu benda akibat gaya gravitasi. Gaya gravitasi bumi tidak lain merupakan berat benda, yaitu besarnya gaya tarik bumi yang bekerja pada benda. Jika massa bumi M dengan jari-jari R , maka besarnya gaya gravitasi bumi pada benda yang bermassa m dirumuskan:

$$F = G \frac{M \cdot m}{R^2} \dots\dots\dots (2.2)$$

Karena $w = F$ dan $w = m \cdot g$, maka:

$$m \cdot g = G \frac{M \cdot m}{R^2}$$

$$g = G \frac{M.m}{m.R^2}$$

$$g = G \frac{M}{R^2} \dots\dots\dots (2.3)$$

dengan:

- g = percepatan gravitasi (m/s^2)
- M = massa bumi (kg)
- R = jari-jari bumi (m)
- G = konstanta gravitasi (Nm^2/kg^2)

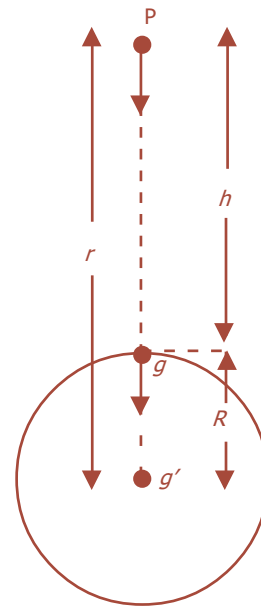
Apabila benda berada pada ketinggian h dari permukaan bumi atau berjarak $r = R + h$ dari pusat bumi, maka perbandingan g' pada jarak R dan g pada permukaan bumi dirumuskan:

$$\frac{g'}{g} = \frac{\frac{G.M}{(R+h)^2}}{\frac{G.M}{R^2}} = \frac{R^2}{(R+h)^2}$$

atau $g' = \left(\frac{R}{R+h} \right)^2 \cdot g \dots\dots\dots (2.4)$

dengan:

- g = percepatan gravitasi pada permukaan bumi (m/s^2)
- g' = percepatan gravitasi pada ketinggian h dari permukaan bumi (m/s^2)
- R = jari-jari bumi (m)
- h = ketinggian dari permukaan bumi (m)



Gambar 2.2 Percepatan gravitasi pada ketinggian h dari permukaan bumi.

Contoh Soal

1. Jika massa bumi $5,98 \times 10^{24}$ kg dan jari-jari bumi 6.380 km, berapakah percepatan gravitasi di puncak Mount Everest yang tingginya 8.848 m di atas permukaan bumi? ($G = 6,67 \times 10^{-11} \text{ Nm}^2/\text{kg}^2$)

Penyelesaian:

- Diketahui: $h = 8.848 \text{ m} = 8,848 \text{ km}$
 $M = 5,98 \times 10^{24} \text{ kg}$
 $R = 6.380 \text{ km}$
 $G = 6,67 \times 10^{-11} \text{ Nm}^2/\text{kg}^2$

Ditanya: $g = \dots?$

Jawab:

$$r = R + h$$

$$= (6.380 + 8,848) \text{ km} = 6.389 \text{ km} = 6,389 \times 10^6 \text{ m}$$

$$g = G \frac{M}{R^2} = 6,67 \times 10^{-11} \frac{5,98 \times 10^{24}}{(6,389 \times 10^6)^2} = 9,77 \text{ m/s}^2$$

2. Apabila percepatan gravitasi di permukaan bumi adalah g , tentukan percepatan gravitasi suatu benda yang berada pada ketinggian 2 kali jari-jari bumi!

Penyelesaian:

Diketahui: $h = 2R$

Ditanya: $g = \dots ?$

$$g' = \left(\frac{R}{R+h} \right)^2 \cdot g = \left(\frac{R}{R+2R} \right)^2 \cdot g = \frac{1}{9}g$$

Uji Kemampuan 2.2

Planet Jupiter dengan massa $1,9 \times 10^{27}$ kg memiliki jari-jari sebesar $7,0 \times 10^7$ m. Jika gravitasi di Bumi adalah $9,8 \text{ m/s}^2$, hitunglah perbandingan percepatan gravitasi di Jupiter dengan di Bumi!



Penerapan Hukum Gravitasi Newton

1. Menentukan Massa Bumi

Massa Bumi dapat ditentukan berdasarkan persamaan (2.2). Mengingat percepatan gravitasi di permukaan bumi $g = 9,8 \text{ m/s}^2$, jari-jari bumi $R = 6,38 \times 10^6 \text{ m}$ dan konstanta gravitasi $G = 6,67 \times 10^{-11} \text{ Nm}^2/\text{kg}^2$, maka:

$$g = G \frac{M}{R^2}, \text{ maka:}$$

$$M = \frac{gR^2}{G} \dots\dots\dots (2.5)$$

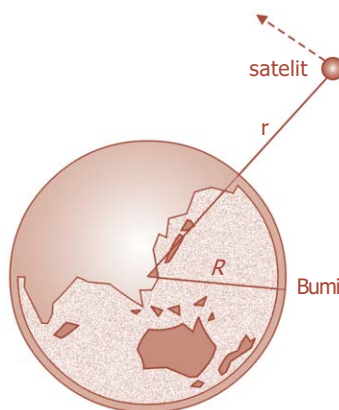
2. Orbit Satelit Bumi

Satelit-satelit yang bergerak dengan orbit melingkar (hampir berupa lingkaran) dan berada pada jarak r dari pusat bumi, maka kelajuan satelit saat mengorbit Bumi dapat dihitung dengan menyamakan gaya gravitasi dan gaya sentripetalnya.

Berdasarkan Hukum II Newton $\Sigma F = m \cdot a_{\text{sat}}$, maka:

$$\frac{G \cdot M \cdot m}{r^2} = m \frac{v^2}{r}$$

$$v = \sqrt{\frac{G \cdot M}{r}} \dots\dots\dots (2.6)$$



Gambar 2.3 Kelajuan satelit mengorbit Bumi dipengaruhi jarak r dari pusat bumi.

Diameter bumi mencapai 13.000 km dengan jarak rata-rata Bumi dan Matahari sekitar 150 juta km. Bumi memerlukan waktu 24 jam untuk melakukan rotasi dan memerlukan waktu 365,25 hari untuk menyelesaikan satu kali revolusi.

Pada saat geosinkron, dimana periode orbit satelit sama dengan periode rotasi bumi, maka jari-jari orbit satelit dapat ditentukan sebagai berikut:

$$\frac{G \cdot M \cdot m}{r^2} = m \frac{v^2}{r}$$

Karena $v = \frac{2\pi r}{T}$, maka:

$$\frac{G \cdot M}{r^2} = \frac{(2\pi r)^2}{r T^2}$$

$$r = \sqrt[3]{\frac{G \cdot M \cdot T^2}{4\pi^2}} \dots\dots\dots (2.7)$$

T adalah periode satelit mengelilingi Bumi, yang besarnya sama dengan periode rotasi bumi.

$$\begin{aligned} T &= 1 \text{ hari} \\ &= 24 \text{ jam} \\ &= 86.400 \text{ sekon} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} R &= \sqrt[3]{\frac{(6,67 \times 10^{-11})(5,98 \times 10^{24})(86.400)^2}{4(3,14)^2}} \\ &= 4,23 \times 10^7 \text{ m} \end{aligned}$$

Jadi ketinggian satelit adalah $4,23 \times 10^7$ m dari pusat bumi atau 36.000 km di atas permukaan bumi.

Contoh Soal

Tentukan massa bumi jika jari-jari bumi $6,38 \times 10^6$ m, konstanta gravitasi $6,67 \times 10^{-11} \text{ Nm}^2/\text{kg}^2$, dan percepatan gravitasi $9,8 \text{ m/s}^2$!

Penyelesaian:

$$\begin{aligned} \text{Diketahui: } R &= 6,38 \times 10^6 \text{ m} \\ G &= 6,67 \times 10^{-11} \text{ Nm}^2/\text{kg}^2 \\ g &= 9,8 \text{ m/s}^2 \end{aligned}$$

$$\text{Ditanya: } M = \dots ?$$

Jawab:

$$\begin{aligned} M &= \frac{gR^2}{G} \\ &= \frac{9,8(6,38 \times 10^6)^2}{6,67 \times 10^{-11}} \\ &= 5,98 \times 10^{24} \text{ kg} \end{aligned}$$

Kegiatan

Tujuan : Menentukan berat badan dalam newton di berbagai planet.
 Alat dan bahan : Timbangan badan, pensil, dan kertas.

Cara Kerja:

1. Tentukan berat badan kalian (dalam kg) menggunakan timbangan badan.
2. Hitunglah berat badan kalian tersebut dalam newton (N) dengan $g = 9,8 \text{ m/s}^2$.
3. Catatlah berat kalian di Bumi pada tabel data berat.
4. Tentukan dan catatlah berat badan kalian di berbagai planet dengan mengikuti format tabel berikut ini.



No.	Planet	Nilai Gravitasi (m/s^2)	Berat di Bumi (N)	Berat di Planet Lain (N)
1.	Merkurius	0,38		
2.	Venus	0,91		
3.	Mars	0,38		
4.	Jupiter	2,54		
5.	Saturnus	1,16		
6.	Uranus	0,91		
7.	Neptunus	1,19		

Diskusi:

1. Di planet manakah nilai berat badan kalian paling kecil? Mengapa demikian?
2. Di planet manakah nilai berat badan kalian paling besar? Mengapa demikian?
3. Nilai gravitasi (N.G) benda angkasa adalah gravitasi permukaannya dibagi dengan gravitasi permukaan bumi. N.G bumi adalah 1 g.
 - a. Sebutkan planet-planet yang nilai gravitasinya kurang dari 1!
 - b. Sebutkan planet-planet yang nilai gravitasinya lebih dari 1!
4. Tulislah kesimpulan kalian!

Uji Kemampuan 2.3

1. Jika percepatan gravitasi di Venus adalah $9,8 \text{ m/s}^2$ dan jari-jarinya $6,05 \times 10^6 \text{ m}$, berapakah massa Venus?
2. Periode orbit Uranus adalah 62.000 sekon. Jika massa matahari $2,0 \times 10^{30} \text{ kg}$, tentukan jari-jari orbit Uranus!



D. Hukum-Hukum Kepler

Johanes Kepler (1571 - 1630), telah berhasil menjelaskan secara rinci mengenai gerak planet di sekitar Matahari. Kepler mengemukakan tiga hukum yang berhubungan dengan peredaran planet terhadap Matahari yang akan diuraikan berikut ini.

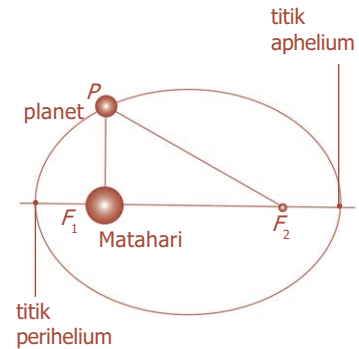
1. Hukum I Kepler

Hukum I Kepler berbunyi:

Setiap planet bergerak mengitari Matahari dengan lintasan berbentuk elips, Matahari berada pada salah satu titik fokusnya.

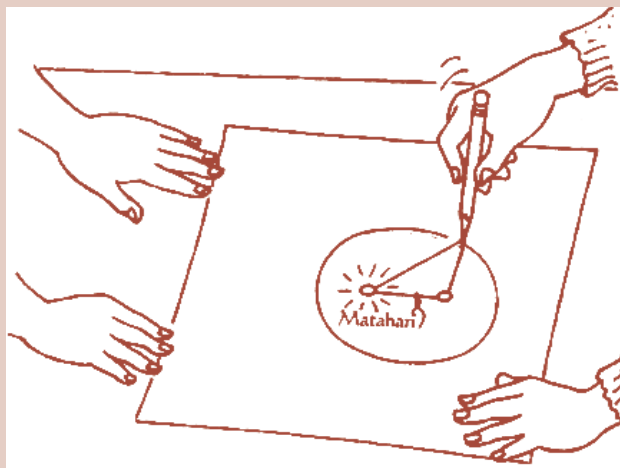
Perhatikan Gambar 2.4 di samping.

Elips merupakan sebuah kurva tertutup sedemikian rupa sehingga jumlah jarak pada sembarang titik P pada kurva dengan kedua titik yang tetap (titik fokus) tetap konstan, sehingga jumlah jarak $F_1P + F_2P$ tetap sama untuk semua titik pada kurva.



Gambar 2.4 Lintasan planet mengitari Matahari berbentuk elips dengan Matahari sebagai pusatnya.

Percikan Fisika



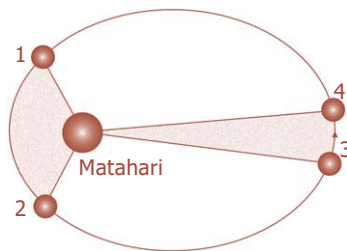
dengan meregangkan ikal, diperoleh bentuk elips. Posisi setiap jarum disebut fokus. Pada sistem tata surya, Matahari berada pada salah satu fokus elips dalam orbit planet.

Dalam sebuah orbit planet titik yang paling dekat dengan matahari disebut *perihelium* dan titik yang paling jauh dari Matahari disebut *aphelium*.

Menggambar Elips

Sebuah lingkaran memiliki satu titik pusat, sedangkan elips (bentuk orbit planet) memiliki dua fokus (titik-titik yang saling segaris dan berada di kedua sisi titik pusat elips).

Sebuah elips dapat digambar dengan menancapkan dua jarum pada papan dan menghubungkannya dengan ikatan benang. Jika pensil diletakkan di dalam ikal dan digerakkan di sekitar jarum



Gambar 2.5 Dua daerah yang diarsir mempunyai luas yang sama.

2. Hukum II Kepler

Hukum II Kepler berbunyi:

Suatu garis khayal yang menghubungkan Matahari dengan planet menyapu daerah yang luasnya sama dalam waktu yang sama.

Perhatikan Gambar 2.5 di samping.

Berdasarkan Hukum II Kepler, planet akan bergerak lebih cepat apabila dekat Matahari dan bergerak lebih lambat apabila berada jauh dari Matahari.

3. Hukum III Kepler

Hukum III Kepler berbunyi:

Perbandingan kuadrat periode planet mengitari Matahari terhadap pangkat tiga jarak rata-rata planet ke Matahari adalah sama untuk semua planet.

Secara matematis dituliskan:

$$\frac{T^2}{r^3} = k, \text{ atau } \frac{T_1^2}{r_1^3} = \frac{T_2^2}{r_2^3}$$

$$\text{atau } \left(\frac{T_1}{T_2}\right)^2 = \left(\frac{r_1}{r_2}\right)^3 \dots\dots\dots (2.8)$$

Jadi,

$$r_1 = \sqrt[3]{\frac{T_1^2 \times r_2^3}{T_2^2}}; \quad T_1 = \sqrt{\frac{r_1^3 \times T_2^2}{r_2^3}}$$

$$r_2 = \sqrt[3]{\frac{r_1^3 \times T_2^2}{T_1^2}}; \quad T_2 = \sqrt{\frac{T_1^2 \times r_2^3}{r_1^3}}$$

Tabel 2.1 Data planet yang dipakai pada Hukum III Kepler

Planet	Jarak rata-rata dari Matahari r (10^6 km)	Periode T (tahun Bumi)	r^3/T^2 (10^{24} km ³ /th ²)
Merkurius	57,9	0,241	3,34
Venus	108,2	0,615	3,35
Bumi	149,6	1,0	3,35
Mars	227,9	1,88	3,35
Jupiter	778,3	11,86	3,35
Saturnus	1427	29,5	3,34
Uranus	2870	84,0	3,35
Neptunus	4497	165	3,34

Newton dapat menunjukkan bahwa Hukum-Hukum Kepler dapat diturunkan secara matematis dari Hukum Gravitasi dan hukum-hukum gerak. Kita akan menurunkan Hukum III Newton untuk keadaan khusus, yaitu planet bergerak melingkar. Apabila massa planet m bergerak dengan kelajuan v , jarak rata-rata planet ke Matahari r , dan massa Matahari M , maka berdasarkan Hukum II Newton tentang gerak, dapat kita nyatakan sebagai berikut:

$$\Sigma F = m \cdot a$$

$$\frac{G \cdot M \cdot m}{r^2} = \frac{m \cdot v^2}{r}$$

Apabila periode planet adalah T , maka:

$$v = \frac{2\pi r}{T}, \text{ sehingga:}$$

$$\frac{G \cdot M \cdot m}{r^2} = m \frac{4\pi^2 r^2}{T^2}$$

$$\frac{G \cdot M}{r^2} = \frac{4\pi^2 r^2}{T^2}$$

$$\frac{T^2}{r^3} = \frac{4\pi^2}{G \cdot M} \dots\dots\dots (2.9)$$


Persamaan (2.9) berlaku juga untuk planet lain (misal 1):

$$\frac{T_1^2}{r_1^3} = \frac{4\pi^2}{G \cdot M} \dots\dots\dots (2.10)$$

Dari persamaan (2.9) dan (2.10) dapat disimpulkan:

$$\frac{T^2}{r^3} = \frac{T_1^2}{r_1^3}, \text{ atau } \left(\frac{T}{T_1} \right)^2 = \left(\frac{r}{r_1} \right)^3 \dots\dots\dots (2.11)$$

Hal ini sesuai dengan Hukum III Kepler.



Dari ketiga Hukum Kepler disimpulkan berikut ini.

- Jumlah jarak pada sembarang titik pada kurva (bentuk elips) kedua titik yang tetap, tetap konstan.
- Planet bergerak paling cepat pada lintasan yang paling dekat Matahari.

$$\left(\frac{T}{T_1} \right)^2 = \left(\frac{r}{r_1} \right)^3$$

Contoh Soal

Jarak rata-rata Merkurius dengan Matahari 58 juta km. Jika revolusi Mars adalah 687 hari, dan jarak planet Mars dengan Matahari 228 juta km, tentukan periode revolusi Merkurius!

Penyelesaian:

Diketahui: $R_{\text{Merkurius}} = 58 \text{ juta km}$
 $T_{\text{Mars}} = 687 \text{ hari}$
 $R_{\text{Mars}} = 228 \text{ juta km}$
 Ditanya: $T_{\text{Merkurius}} = \dots ?$

Jawab:

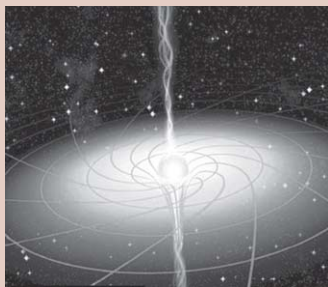
$$\frac{T_{\text{Merkurius}}^2}{T_{\text{Mars}}^2} = \frac{R_{\text{Merkurius}}^3}{R_{\text{Mars}}^3}$$
$$\frac{T_{\text{Merkurius}}^2}{(687)^2} = \frac{(58 \times 10^6)^3}{(228 \times 10^6)^3}$$
$$T_{\text{Merkurius}} = 88 \text{ hari}$$

Uji Kemampuan 2.4

Periode Jupiter mengelilingi Matahari adalah 12 tahun dan jarak Jupiter ke Matahari 778 km. Jika periode Saturnus mengelilingi Matahari adalah 30 tahun, berapakah jarak Saturnus ke Matahari?

Percikan Fisika

Lubang Hitam (Black Hole)



Lubang hitam adalah benda yang memiliki tarikan gravitasi demikian dahsyat, sehingga tidak ada apa pun, termasuk cahaya, yang dapat lepas darinya. Pada tahun 1780-an seorang fisikawan Inggris, John Michell, menyatakan bahwa bintang yang besarnya 500 kali Matahari, tetapi dengan kepadatan yang sama, akan menjerat cahaya. Teori Einstein menyatakan bahwa setiap jumlah materi akan melengkungkan ruang-waktu secara sempurna di sekeliling dirinya, dan menjadikannya sebuah lubang hitam.

Fiesta

Fisikawan Kita



Johanes Kepler (1571 - 1630)

Seorang ahli astronomi dan matematika dari Jerman, menemukan Hukum Kepler, teleskop Kepler, dan teori cahaya. Tahun 1596, Kepler menulis buku dengan judul *Mysterium Cosmographicum* (Misteri Alam Semesta) berisi tentang garis edar planet yang merupakan penyempurnaan teori heliosentris Copernicus. Hukum Kepler meliputi tiga, yaitu Hukum I Kepler, Hukum II Kepler, dan Hukum III Kepler dalam bukunya *Astronomia Astro* dan *Harmonice Mundi*.

- ✱ Gaya gravitasi adalah gaya interaksi yang berupa tarik-menarik antara benda.
- ✱ Hukum Gravitasi Newton berbunyi: “Setiap benda di alam semesta menarik benda lain dengan gaya yang besarnya berbanding lurus dengan hasil kali massa-massanya dan berbanding terbalik dengan kuadrat jarak antara keduanya”,

$$\text{dirumuskan: } F = G \frac{m_1 \cdot m_2}{r^2}$$

Cavendish mendapatkan nilai G sebesar $6,67 \times 10^{-11} \text{ Nm}^2/\text{kg}^2$.

- ✱ Percepatan gravitasi adalah percepatan suatu benda akibat gaya gravitasi, yang besarnya: $g = G \frac{M}{R^2}$.

- ✱ Apabila benda berada pada ketinggian h dari permukaan bumi atau $R + h$ dari pusat bumi, maka besarnya percepatan gravitasi benda tersebut adalah:

$$g' = \left(\frac{R}{R+h} \right)^2 \cdot g$$

- ✱ Massa bumi dapat dihitung dari persamaan percepatan gravitasi, yang besarnya $M = 5,98 \times 10^{24} \text{ kg}$.

- ✱ Orbit geosinkron adalah orbit satelit dimana periodenya sama dengan periode rotasi bumi. Besarnya laju satelit adalah: $v = \sqrt{\frac{G \cdot M}{r}}$, dengan ketinggian satelit: $r^3 = \frac{G \cdot M \cdot T^2}{4\pi^2}$.

- ✱ Kepler mengemukakan tiga hukum yang berhubungan dengan peredaran planet terhadap Matahari, yaitu:

- a. Hukum I Kepler: “Setiap planet bergerak mengitari Matahari dengan lintasan berbentuk elips, Matahari berada pada salah satu titik fokusnya”.
- b. Hukum II Kepler: “Suatu garis khayal yang menghubungkan Matahari dengan planet menyapu daerah yang luasnya sama dalam waktu yang sama”.
- c. Hukum III Kepler: “Perbandingan kuadrat periode planet mengitari Matahari dengan pangkat tiga jarak rata-rata planet ke Matahari adalah

$$\text{sama untuk semua planet”, dirumuskan: } \frac{T^2}{r^3} = k, \text{ atau } \frac{T^2}{r^3} = \frac{T_1^2}{r_1^3}.$$

Uji Kompetensi

A. Pilihlah jawaban yang paling tepat!

1. Apabila dimensi panjang, massa, dan waktu berturut-turut adalah L, M, dan T, maka dimensi dan konstanta gravitasi adalah
 - a. ML^2T^{-2}
 - d. $M^{-1}L^3T^{-2}$
 - b. $M^{-1}L^2T^{-2}$
 - e. $M^{-1}L^{-3}T^{-2}$
 - c. $M^{-1}L^2T^2$
2. Andaikata Bumi menyusut hingga setengah dari semula, tetapi massanya tetap, maka massa benda-benda yang ada di permukaan bumi adalah
 - a. empat kali semula
 - d. setengah kali semula
 - b. dua kali semula
 - e. seperempat kali semula
 - c. tetap
3. Berat benda di Bumi adalah 10 N. Jika benda dibawa ke planet yang massanya 4 kali massa bumi dan jari-jarinya 2 kali jari-jari bumi, berat benda menjadi
 - a. 7,5 N
 - d. 12,5 N
 - b. 8 N
 - e. 15 N
 - c. 10 N
4. Benda pada permukaan bumi memiliki percepatan gravitasi $\frac{1}{6}g$ (g = percepatan gravitasi di permukaan bumi). Jika Bumi dianggap bulat sempurna dengan jari-jari R , maka jarak benda tersebut di atas permukaan bumi adalah
 - a. R
 - d. $4R$
 - b. $2R$
 - e. $6R$
 - c. $3R$
5. Sebuah satelit cuaca beratnya 200 N sedang mengelilingi Bumi dengan orbit $\frac{3}{2}R$ (R = jari-jari bumi). Berat satelit jika di permukaan bumi adalah
 - a. 200 N
 - d. 450 N
 - b. 250 N
 - e. 600 N
 - c. 300 N
6. Percepatan gravitasi di suatu planet sama dengan gravitasi di permukaan bumi. Jika massa bumi M dan diameter planet dua kali diameter bumi, maka massa planet adalah
 - a. $0,25M$
 - d. $2M$
 - b. $0,5M$
 - e. $4M$
 - c. M
7. Jarak antara Bumi dengan Bulan adalah 383.000 km. Massa bulan sama dengan $\frac{1}{81}$ kali massa bumi. Suatu benda yang terletak antara Bumi dan Bulan beratnya sama dengan nol. Jarak benda terhadap Bumi adalah
 - a. 302.800 km
 - d. 361.200 km
 - b. 321.600 km
 - e. 382.400 km
 - c. 344.700 km

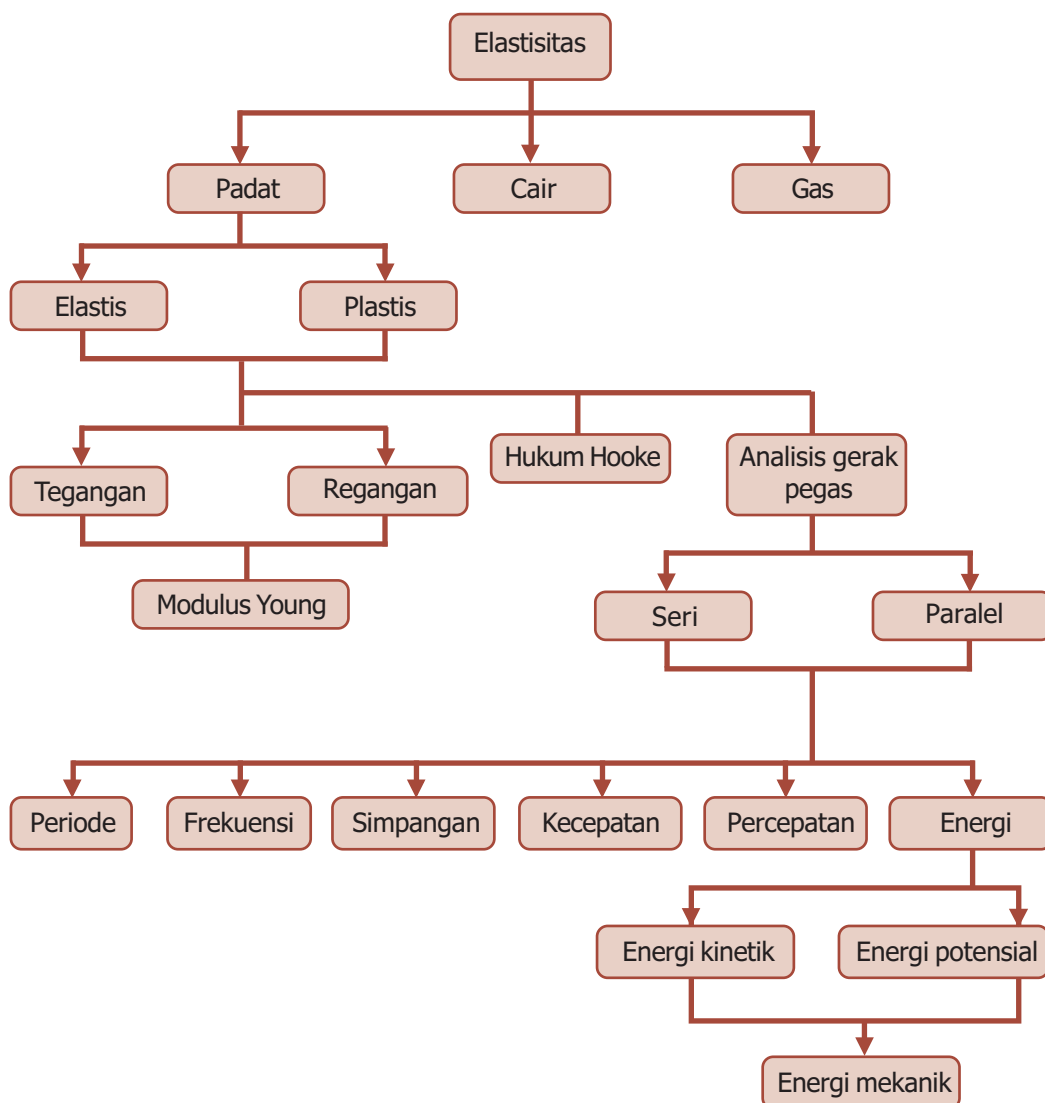
8. Sebuah satelit komunikasi mempunyai berat w di permukaan bumi. Jika satelit mengitari Bumi dalam suatu orbit lingkaran dengan jari-jari dua kali jari-jari bumi, maka berat satelit tersebut adalah
- nol
 - $\frac{w}{9}$
 - $\frac{w}{4}$
 - $\frac{w}{3}$
 - $\frac{w}{2}$
9. Perbandingan periode planet A dan B adalah 8 : 27. Jika jarak rata-rata planet A terhadap Matahari adalah 4 satuan astronomi (SA), maka jarak rata-rata planet B terhadap Matahari adalah
- 6 SA
 - 7 SA
 - 8 SA
 - 9 SA
 - 10 SA
10. Jarak rata-rata planet A dan B terhadap Matahari, masing-masing berbanding 4 : 1. Jika periode planet A adalah 704 hari, maka periode planet B adalah
- 64 hari
 - 88 hari
 - 104 hari
 - 124 hari
 - 176 hari

B. Jawablah dengan singkat dan benar!

- Berapakah besarnya gaya gravitasi yang bekerja pada sebuah pesawat ruang angkasa yang bermassa $m = 2.500 \text{ kg}$ dan mengorbit Bumi dengan jari-jari orbit $1,3 \times 10^7 \text{ m}$? ($M = 5,98 \times 10^{24} \text{ kg}$)
- Berat benda di permukaan bumi adalah 294 N ($g = 9,8 \text{ m/s}^2$). Berapakah berat benda tersebut di permukaan bulan yang memiliki jari-jari $\frac{1}{4}$ jari-jari bumi?
- Massa Jupiter adalah $1,9 \times 10^{27} \text{ kg}$ dan massa matahari adalah $2,0 \times 10^{30} \text{ kg}$. Jika jarak rata-rata antara Matahari dengan Jupiter adalah $7,8 \times 10^{11} \text{ m}$, $G = 6,67 \times 10^{-11} \text{ Nm}^2/\text{kg}^2$, dan periode revolusi Jupiter adalah $3,75 \times 10^6 \text{ m}$, tentukan:
 - gaya gravitasi Matahari pada Jupiter,
 - laju linier orbit Jupiter, jika lintasannya dianggap sebagai lingkaran!
- Apabila percepatan gravitasi di permukaan bumi $g = 9,8 \text{ m/s}^2$, tentukan percepatan gravitasi pada ketinggian $3R$ dari permukaan bumi! ($R = \text{jari-jari bumi} = 6,38 \times 10^6 \text{ m}$)
- Periode bumi mengelilingi Matahari adalah 1 tahun. Jika jari-jari lintasan suatu planet mengelilingi Matahari dua kali jari-jari lintasan bumi mengelilingi Matahari, tentukan periode planet tersebut! ($R = 6,38 \times 10^6 \text{ m}$)

PETA KONSEP

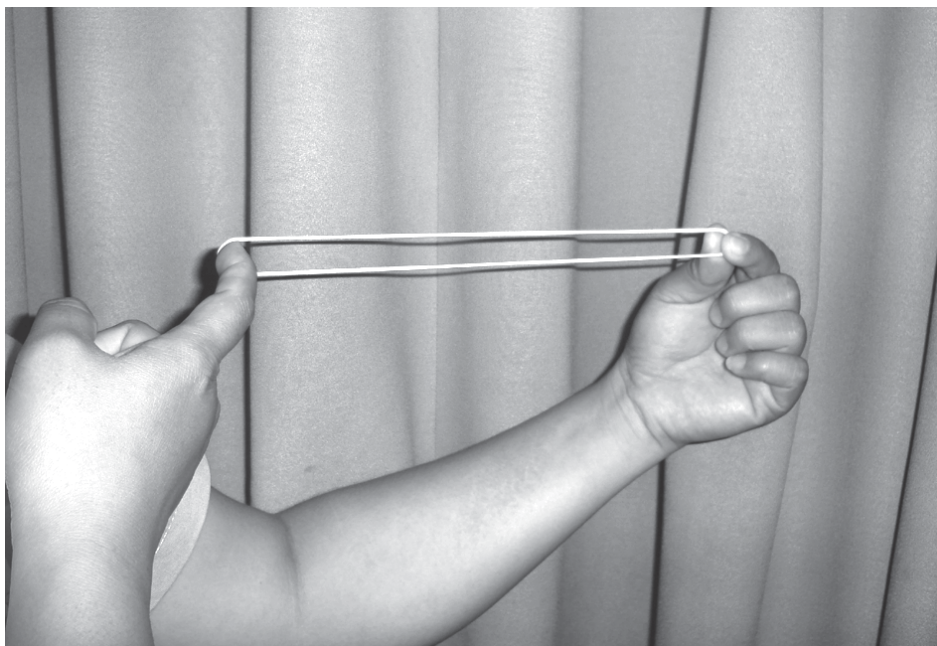
Bab 3 Pengaruh Gaya pada Elastisitas Bahan



BAB

3

PENGARUH GAYA PADA ELASTISITAS BAHAN



- Gelang karet yang diregangkan akan kembali ke keadaan semula setelah gaya dihilangkan.

Sumber: *Dokumen Penerbit*, 2006

Coba kalian regangkan karet gelang! Coba pula regangkan plastisin! Apa yang terjadi pada keduanya setelah kalian regangkan? Tentu keduanya akan berubah bentuk karena kita kenai gaya pada kedua benda tersebut. Hal ini juga berkaitan dengan sifat elastisitas bahan yang memengaruhi keadaannya setelah gaya kita hilangkan.

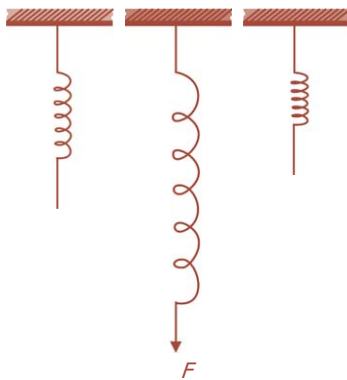
Kata Kunci

deformasi, elastisitas, gaya dalam, gaya luar, regangan, tegangan

Semua benda, baik yang berwujud padat, cair, ataupun gas akan mengalami perubahan bentuk dan ukurannya apabila benda tersebut diberi suatu gaya. Benda padat yang keras sekalipun jika dipengaruhi oleh gaya yang cukup besar akan berubah bentuknya. Ada beberapa benda yang akan kembali ke bentuk semula setelah gaya dihilangkan, tetapi ada juga yang berubah menjadi bentuk yang baru. Hal itu berkaitan dengan sifat elastisitas benda. Apakah yang dimaksud elastisitas? Bagaimana pengaruh gaya pada sifat elastisitas bahan?



Elastisitas Zat Padat

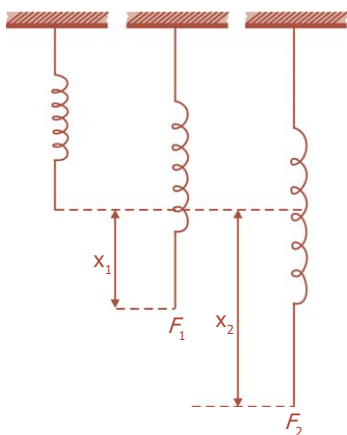


Gambar 3.1 Sifat elastisitas pada pegas.

Elastisitas adalah sifat benda yang cenderung mengembalikan keadaan ke bentuk semula setelah mengalami perubahan bentuk karena pengaruh gaya (tekanan atau tarikan) dari luar. Benda-benda yang memiliki elastisitas atau bersifat elastis, seperti karet gelang, pegas, dan pelat logam disebut **benda elastis** (Gambar 3.1). Adapun benda-benda yang tidak memiliki elastisitas (tidak kembali ke bentuk awalnya) disebut **benda plastis**. Contoh benda plastis adalah tanah liat dan plastisin (lilin mainan).

Ketika diberi gaya, suatu benda akan mengalami **deformasi**, yaitu perubahan ukuran atau bentuk. Karena mendapat gaya, molekul-molekul benda akan bereaksi dan memberikan gaya untuk menghambat deformasi. Gaya yang diberikan kepada benda dinamakan gaya luar, sedangkan gaya reaksi oleh molekul-molekul dinamakan gaya dalam. Ketika gaya luar dihilangkan, gaya dalam cenderung untuk mengembalikan bentuk dan ukuran benda ke keadaan semula.

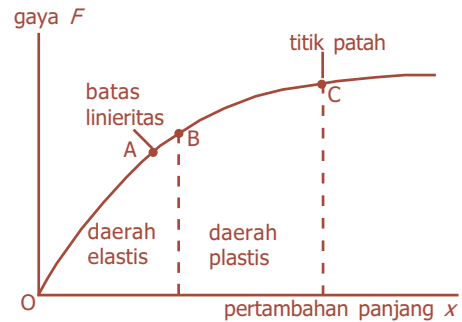
Apabila sebuah gaya F diberikan pada sebuah pegas (Gambar 3.2), panjang pegas akan berubah. Jika gaya terus diperbesar, maka hubungan antara perpanjangan pegas dengan gaya yang diberikan dapat digambarkan dengan grafik seperti pada Gambar 3.3.



Gambar 3.2 Batas elastisitas pada pegas.

Berdasarkan grafik tersebut, garis lurus OA menunjukkan besarnya gaya F yang sebanding dengan pertambahan panjang x . Pada bagian ini pegas dikatakan meregang secara linier. Jika F diperbesar lagi sehingga melampaui titik A, garis tidak lurus lagi. Hal ini dikatakan batas linieritasnya sudah terlampaui, tetapi pegas masih bisa kembali ke bentuk semula.

Apabila gaya F diperbesar terus sampai melewati titik B, pegas bertambah panjang dan tidak kembali ke bentuk semula setelah gaya dihilangkan. Ini disebut **batas elastisitas** atau kelentingan pegas. Jika gaya terus diperbesar lagi hingga di titik C, maka pegas akan putus. Jadi, benda elastis mempunyai batas elastisitas. Jika gaya yang diberikan melebihi batas elastisitasnya, maka pegas tidak mampu lagi menahan gaya sehingga akan putus.



Gambar 3.3 Grafik hubungan gaya dengan pertambahan panjang pegas.

Uji Kemampuan 3.1

1. Sebuah pegas memiliki elastisitas, namun jika diberikan gaya yang sangat besar, pegas tersebut tidak dapat kembali ke bentuknya semula. Mengapa demikian?
2. Karet gelang memiliki sifat elastis. Jika kita merentangkan sebuah karet gelang dan melepaskannya kembali maka karet gelang tersebut akan kembali ke bentuk semula. Namun, apakah yang terjadi jika gaya rentang yang kita berikan terlalu besar? Mengapa demikian?



B. Tegangan dan Regangan

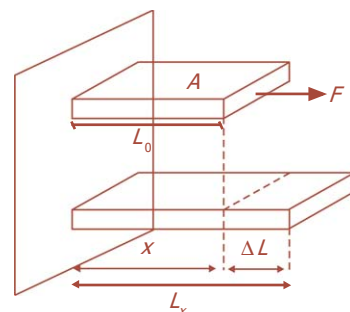
Perubahan bentuk dan ukuran benda bergantung pada arah dan letak gaya luar yang diberikan. Ada beberapa jenis deformasi yang bergantung pada sifat elastisitas benda, antara lain *tegangan (stress)* dan *regangan (strain)*. Perhatikan Gambar 3.4 yang menunjukkan sebuah benda elastis dengan panjang L_0 dan luas penampang A diberikan gaya F sehingga bertambah panjang ΔL . Dalam keadaan ini, dikatakan benda mengalami tegangan.

Tegangan menunjukkan kekuatan gaya yang menyebabkan perubahan bentuk benda. **Tegangan** (stress) didefinisikan sebagai perbandingan antara gaya yang bekerja pada benda dengan luas penampang benda. Secara matematis dituliskan:

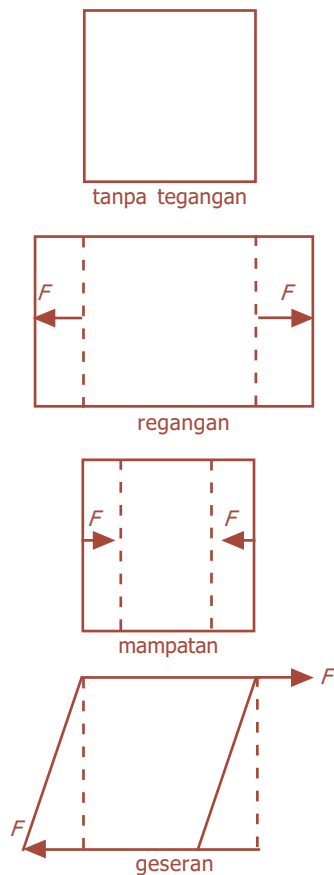
$$\sigma = \frac{F}{A} \dots\dots\dots (3.1)$$

dengan:

- σ = tegangan (Pa)
 F = gaya (N)
 A = luas penampang (m^2)



Gambar 3.4 Benda elastis dengan pertambahan panjang ΔL .



Gambar 3.5 Jenis-jenis tegangan.

Satuan SI untuk tegangan adalah pascal (Pa), dengan konversi:

$$1 \text{ pascal} = \frac{1 \text{ newton}}{1 \text{ meter}^2} \text{ atau } 1 \text{ Pa} = 1 \text{ N/m}^2$$

Tegangan dibedakan menjadi tiga macam, yaitu regangan, mampatan, dan geseran, seperti ditunjukkan Gambar 3.5.

Adapun **regangan** (strain) didefinisikan sebagai perbandingan antara pertambahan panjang batang dengan panjang mula-mula dinyatakan:

$$e = \frac{\Delta L}{L} \dots\dots\dots (3.2)$$

dengan:

e = regangan

ΔL = pertambahan panjang (m)

L = panjang mula-mula (m)

Regangan merupakan ukuran mengenai seberapa jauh batang tersebut berubah bentuk. Tegangan diberikan pada materi dari arah luar, sedangkan regangan adalah tanggapan materi terhadap tegangan. Pada daerah elastis, besarnya tegangan berbanding lurus dengan regangan. Perbandingan antara tegangan dan regangan benda tersebut disebut modulus elastisitas atau **modulus Young**. Pengukuran modulus Young dapat dilakukan dengan menggunakan gelombang akustik, karena kecepatannya bergantung pada modulus Young. Secara matematis dirumuskan:

$$E = \frac{\sigma}{e} \dots\dots\dots (3.3)$$

$$E = \frac{\frac{F}{A}}{\frac{\Delta L}{L}} \dots\dots\dots (3.4)$$

$$E = \frac{F.L}{A.\Delta L} \dots\dots\dots (3.4)$$

dengan:

E = modulus Young (N/m^2)

F = gaya (N)

L = panjang mula-mula (m)

ΔL = pertambahan panjang (m)

A = luas penampang (m^2)

Nilai modulus Young hanya bergantung pada jenis benda (komposisi benda), tidak bergantung pada ukuran atau bentuk benda. Nilai modulus Young beberapa jenis bahan dapat kalian lihat pada Tabel 3.1. Satuan SI untuk E adalah pascal (Pa) atau Nm^2 .

Tabel 3.1 Nilai modulus Young beberapa jenis bahan

Bahan	Modulus Young (N/m^2)
Aluminium	70×10^9
Baja	200×10^9
Besi, gips	100×10^9
Beton	20×10^9
Granit	45×10^9
Karet	$0,5 \times 10^9$
Kuningan	90×10^9
Nikel	210×10^9
Nilon	5×10^9
Timah	16×10^9

Komet

Kolom mengingat

Tegangan dibedakan dengan regangan:

- Tegangan T

$$= \frac{\text{gaya } (F)}{\text{luas penampang } (A)}$$

- Regangan e

$$= \frac{\text{perubahan panjang } (\Delta L)}{\text{panjang mula – mula } (L)}$$

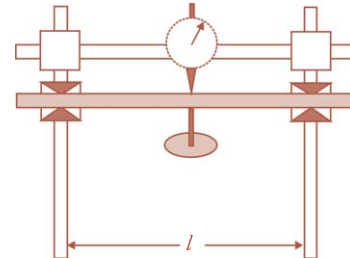
Kegiatan

Tujuan : Menentukan modulus elastisitas dari berbagai jenis logam.

Alat dan bahan : Dial gauge, pegangan dial gauge, batang logam datar, set beban dan penggantung beban, statif, jangka sorong, penggaris.

Cara Kerja:

1. Ukur lebar, tebal, dan panjang batang.
2. Susunlah alat-alat seperti gambar di samping.
3. Ukurlah perubahan jarak lentur pada dial gauge untuk L berbeda dan beban yang sama.
4. Ulangilah langkah no. 3 untuk L yang berbeda-beda dan beban yang sama.



Diskusi:

1. Buatlah tabel data pengamatan kemudian catatlah hasil percobaan tersebut pada tabel yang telah kalian buat!
2. Apakah yang dimaksud modulus elastisitas?
3. Bagaimana cara menghitung modulus elastisitas?

Contoh Soal

Kawat piano dari baja panjangnya 1,6 m dengan diameter 0,2 cm dan modulus Young $2 \times 10^{11} \text{ N/m}^2$. Ketika dikencangkan kawat meregang 0,3 cm. Berapakah besarnya gaya yang diberikan?

Penyelesaian:

Diketahui: $L = 1,6 \text{ m}$ $E = 2 \times 10^{11} \text{ N/m}^2$
 $d = 0,2 \text{ cm} = 2 \times 10^{-3} \text{ m}$ $\Delta L = 0,3 \text{ cm} = 3 \times 10^{-3} \text{ m}$

Ditanya: $F = \dots ?$

Jawab: $r = \frac{1}{2} d = \frac{1}{2} (2 \times 10^{-3}) = 10^{-3} \text{ m}$
 $A = \pi r^2 = 3,14 (1 \times 10^{-3})^2 \text{ m} = 3,14 \times 10^{-6} \text{ m}^2$
 $F = \frac{E \cdot A \cdot \Delta L}{L} = \frac{(2 \times 10^{11})(3,14 \times 10^{-6})(3 \times 10^{-3})}{1,6} = 1.177,5 \text{ N}$

Uji Kemampuan 3.2

Sebuah kawat dengan diameter 4 mm dan panjang 80 cm digantungkan dan diberi beban 3 kg. Jika pertambahan panjang kawat adalah 5 mm, tentukan:

- tegangan kawat,
- regangan kawat, dan
- modulus Young kawat!

Percikan Fisika

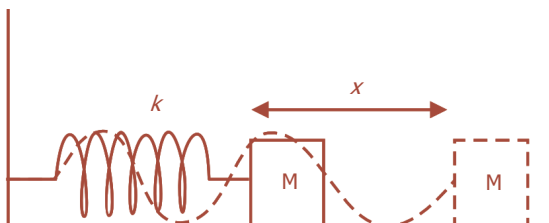


Pembangunan Tembok

Tali, rantai, atau kawat dapat dimanfaatkan jika dalam keadaan tegang. Sementara itu, batu bata dapat dimanfaatkan jika dalam keadaan mampat. Jika batu bata dimampatkan, ia akan memberikan gaya balik yang setara. Itulah dasar pembangunan tembok. Bobot batu bata, ditambah muatan seperti lantai dan atap, menekan bata bersamaan dan membentuk struktur kuat. Semen yang diselipkan di antara bata hanya untuk menyebarkan beban agar merata di seluruh permukaannya.



Hukum Hooke



Gambar 3.6 Gaya yang bekerja pada pegas sebanding dengan pertambahan panjang pegas.

Hubungan antara gaya F yang meregangkan pegas dengan pertambahan panjang pegas x pada daerah elastisitas pertama kali dikemukakan oleh Robert Hooke (1635 - 1703), yang kemudian dikenal dengan Hukum Hooke. Pada daerah elastis linier, besarnya gaya F sebanding dengan pertambahan panjang x .

Secara matematis dinyatakan:

$$F = k \cdot x \dots\dots\dots (3.5)$$

dengan:

F = gaya yang dikerjakan pada pegas (N)

x = pertambahan panjang (m)

k = konstanta pegas (N/m)

Pada saat ditarik, pegas mengadakan gaya yang besarnya sama dengan gaya tarikan tetapi arahnya berlawanan ($F_{aksi} = -F_{reaksi}$). Jika gaya ini disebut gaya pegas F_p maka gaya ini pun sebanding dengan pertambahan panjang pegas.

$$F_p = -F$$

$$F_p = -k \cdot x \dots\dots\dots (3.6)$$

dengan:

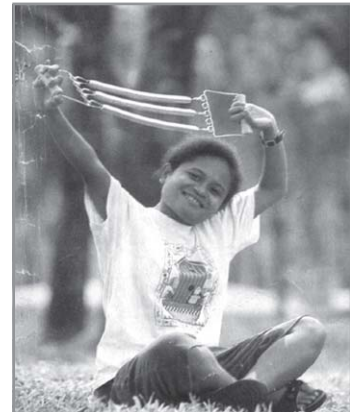
F_p = gaya pegas (N)

Berdasarkan persamaan (3.5) dan (3.6), Hukum Hooke dapat dinyatakan:

Pada daerah elastisitas benda, besarnya pertambahan panjang sebanding dengan gaya yang bekerja pada benda.

Sifat pegas seperti ini banyak digunakan dalam kehidupan sehari-hari, misalnya pada neraca pegas dan pada kendaraan bermotor (pegas sebagai peredam kejut). Dua buah pegas atau lebih yang dirangkai dapat diganti dengan sebuah pegas pengganti. Tetapan pegas pengganti seri dinyatakan oleh persamaan: $\frac{1}{k_s} = \frac{1}{k_1} = \frac{1}{k_2} = \frac{1}{k_3} = \dots = \frac{1}{k_n}$.

Adapun tetapan pegas pengganti paralel (k_p) dinyatakan oleh persamaan: $k_p = k_1 + k_2 + k_3 + \dots k_n$.



Sumber: *Tempo*, Agustus 2005

Gambar 3.7 Tiga buah pegas disusun paralel maka gaya total terbagi pada masing-masing pegas.

Contoh Soal

Sebuah pegas yang panjangnya 15 cm digantungkan vertikal. Jika diberikan gaya 0,5 N, panjang pegas menjadi 25 cm. Berapakah panjang pegas jika diregangkan oleh gaya 0,6 N?

Penyelesaian:

$$\begin{array}{ll} \text{Diketahui: } L_0 = 15 \text{ cm} & F_1 = 0,5 \text{ N} \\ & L_1 = 25 \text{ cm} & F_2 = 0,6 \text{ N} \end{array}$$

$$\text{Ditanya: } x = \dots? (F = 0,6 \text{ N})$$

$$\text{Jawab: } x = L_1 - L_0 = (25 - 15) \text{ cm} = 10 \text{ cm} = 0,1 \text{ m}$$

$$F_1 = k \cdot x$$

$$k = \frac{F_1}{x} = \frac{0,5}{0,1} = 5 \text{ N/m}$$

Untuk $F_2 = 0,6 \text{ N}$, maka:

$$F_2 = k \cdot x$$

$$x = \frac{F_2}{k} = \frac{0,6}{5} = 0,12 \text{ m} = 12 \text{ cm}$$

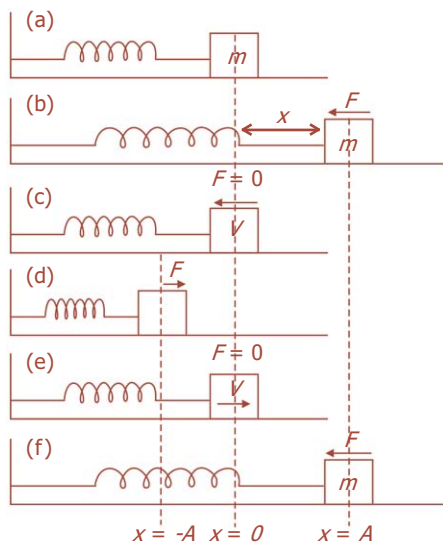
Jadi, panjang pegas = $L_0 + x = (15 + 12) \text{ cm} = 27 \text{ cm}$

Uji Kemampuan 3.3

Sebuah pegas dengan panjang 12 cm digantungkan dan diberi gaya sebesar 1,4 N, maka panjang pegas menjadi 20 cm. Hitunglah panjang pegas jika diregangkan dengan gaya 1,6 N!



D. Analisis Gerakan Pegas



Gambar 3.8 Analisis gerak harmonik pada pegas.

Gerak pegas menyebabkan benda bergerak bolak-balik, yang disebut sebagai gerak harmonik. Gerak harmonik mengarah pada titik kesetimbangan. Perhatikan gambar di samping (Gambar 3.8).

Pegas mempunyai panjang alami, dimana pegas tidak memberikan gaya pada benda. Posisi benda pada titik tersebut disebut setimbang. Jika pegas direntangkan ke kanan, pegas akan memberikan gaya pada benda yang bekerja dalam arah mengembalikan massa ke posisi setimbang. Gaya ini disebut gaya pemulih, yang besarnya berbanding lurus dengan simpangannya.

Sekarang kita perhatikan apa yang terjadi ketika pegas yang awalnya ditarik sejauh x , seperti Gambar 3.8(b) kemudian dilepaskan. Bagaimana gerak benda pada ujung pegas tersebut? Berdasarkan Hukum Hooke, pegas memberikan

gaya pada massa yang menariknya ke posisi setimbang. Karena massa dipercepat oleh gaya pemulih, maka massa akan melewati posisi setimbang dengan kecepatan cukup tinggi. Pada saat melewati titik kesetimbangan, gaya yang bekerja pada massa sama dengan nol, karena $x = 0$, sehingga $F = 0$, tetapi kecepatan benda terus bergerak ke kiri, gaya pemulih berubah arah ke kanan dan memperlambat laju benda tersebut dan menjadi nol ketika melewati titik setimbang dan berhenti sesaat di $x = A$. Selanjutnya, benda bergerak ke kiri dan seterusnya bergerak bolak-balik melalui titik setimbang secara simetris antara $x = A$ dan $x = -A$.

1. Periode dan Frekuensi

Untuk membahas suatu getaran atau gerak harmonik, ada beberapa istilah yang harus diketahui, antara lain periode dan frekuensi. **Periode** didefinisikan sebagai waktu yang diperlukan untuk satu siklus gerak harmonik. Sementara itu, **frekuensi** adalah jumlah siklus gerak harmonik yang terjadi tiap satuan waktu.

Gerak harmonik pegas pada dasarnya merupakan proyeksi gerak melingkar pada salah satu sumbu utamanya, sehingga periode dan frekuensi dapat ditentukan dengan menyamakan gaya pemulih dengan gaya sentripetal.

$$\sum F = m \cdot a_s$$

$$k \cdot x = m \cdot \omega^2 \cdot x$$

$$k = m \cdot \omega^2$$

Karena $\omega = \frac{2\pi}{T}$, maka:

$$k = \frac{m 4\pi^2}{T^2}$$

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{m}{k}} \dots\dots\dots (3.7)$$

Besarnya frekuensi dapat dihitung dari persamaan (3.7),

karena $f = \frac{1}{T}$, maka:

$$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m}} \dots\dots\dots (3.8)$$

dengan:

T = periode (sekon)

m = massa beban (kg)

k = konstanta pegas (N/m)

f = frekuensi (Hz)

2. Susunan Pegas

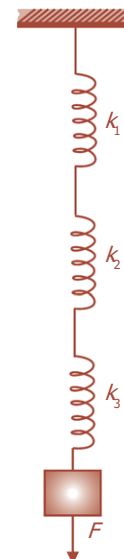
Pada susunan pegas, baik susunan seri, paralel, atau kombinasi keduanya, besarnya konstanta pegas merupakan konstanta pegas pengganti. Misalnya, tiga pegas dengan konstanta gaya k_1 , k_2 , dan k_3 disusun seri seperti pada Gambar 3.10.

Apabila pada ujung susunan pegas bekerja gaya F , maka masing-masing pegas mendapat gaya yang sama besar yaitu F . Berdasarkan Hukum Hooke, pertambahan panjang masing-masing pegas adalah:

$$F = k_1 \cdot x_1 \rightarrow x_1 = \frac{F}{k_1}$$



Gambar 3.9 Benda yang melakukan gerak harmonik dapat dihitung periode dan frekuensinya.



Gambar 3.10 Susunan seri pegas.

Satuan frekuensi Hertz berasal dari nama fisikawan Jerman, Heinrich Rudolf Hertz, yang mendemonstrasikan perambatan gelombang elektromagnetik.

$$F = k_2 \cdot x_2 \quad \rightarrow \quad x_2 = \frac{F}{k_2}$$

$$F = k_3 \cdot x_3 \quad \rightarrow \quad x_3 = \frac{F}{k_3}$$

Pertambahan panjang total susunan pegas:

$$x = x_1 + x_2 + x_3$$

$$\frac{F}{k} = \frac{F}{k_1} + \frac{F}{k_2} + \frac{F}{k_3} + \dots + \frac{F}{k_n}$$

$$\frac{1}{k_s} = \frac{1}{k_1} + \frac{1}{k_2} + \frac{1}{k_3} + \dots + \frac{1}{k_n} \dots\dots\dots (3.9)$$

dengan:

k_s = konstanta gaya total susunan pegas seri

Perhatikan Gambar 3.11. Tiga buah pegas masing-masing dengan konstanta gaya k_1 , k_2 , dan k_3 , disusun paralel dan pada ujung ketiga pegas bekerja gaya F .

Selama gaya F bekerja, pertambahan panjang masing-masing pegas besarnya sama, yaitu:

$$x_1 = x_2 = x_3 = x$$

Karena:

$$F = F_1 + F_2 + F_3$$

maka:

$$k_p x = k_1 x_1 + k_2 x_2 + k_3 x_3$$

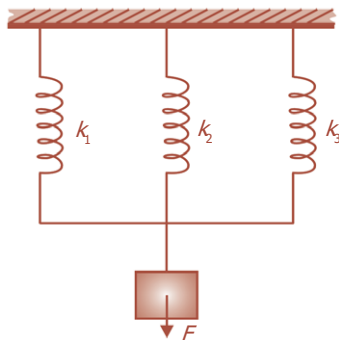
$$k_p x = k_1 x + k_2 x + k_3 x$$

Sehingga:

$$k_p = k_1 + k_2 + k_3 + \dots + k_n \dots\dots\dots (3.10)$$

dengan:

k_p = konstanta gaya total susunan pegas paralel



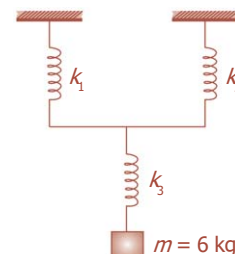
Gambar 3.11 Susunan paralel pegas.

Contoh Soal

Tiga buah pegas identik dengan konstanta gaya 300 N/m disusun seperti gambar. Jika pegas diberi beban bermassa 6 kg, hitunglah pertambahan panjang masing-masing pegas! ($g = 10 \text{ m/s}^2$)

Penyelesaian:

Diketahui: $k_1 = k_2 = k_3 = 300 \text{ N/m}$
 $m = 6 \text{ kg}$
 $g = 10 \text{ m/s}^2$



Ditanya: $x_1, x_2, x_3, x = \dots ?$

Jawab:

$$F = m \cdot g = (6 \text{ kg})(10 \text{ m/s}^2) = 60 \text{ N}$$

k_1 dan k_2 disusun paralel, sehingga:

$$k_p = k_1 + k_2 = (300 + 300) \text{ N/m} = 600 \text{ N/m}$$

$$F = k_p \cdot x_p$$

$$x_p = \frac{F}{k_p} = \frac{60}{600} = 0,1 \text{ m}$$

$$x_1 = x_2 = x_p = 0,1 \text{ m}$$

$$x_3 = \frac{F}{k_3} = \frac{60}{300} = 0,2 \text{ m}$$

$$x = x_p + x_3 = (0,1 + 0,2) \text{ m} = 0,3 \text{ m}$$

3. Simpangan, Kecepatan, dan Percepatan

Simpangan pada gerak harmonik sederhana dapat ditentukan melalui analogi sebuah titik yang bergerak melingkar beraturan. Kecepatan dan percepatan gerak harmonik sederhana merupakan turunan pertama dan kedua dari persamaan simpangan yang merupakan fungsi waktu.

a. Simpangan

Perhatikan Gambar 3.12. Sebuah partikel bergerak melingkar beraturan dengan jari-jari A dan kecepatan sudut ω .

Pada saat $t = 0$, partikel berada di titik P, setelah t sekon berada di Q. Besarnya sudut yang ditempuh adalah:

$$\theta = \omega t = \frac{2\pi t}{T} \dots\dots\dots (3.11)$$

Simpangan gerak harmonik sederhana dapat dianggap proyeksi titik P pada salah satu sumbu utamanya (sumbu y). Jika simpangan itu dinyatakan dengan sumbu y , maka:

$$y = A \cdot \sin \theta = A \cdot \sin \omega t = A \cdot \sin \frac{2\pi t}{T} \dots\dots\dots (3.12)$$

dengan:

y = simpangan gerak harmonik sederhana (m)

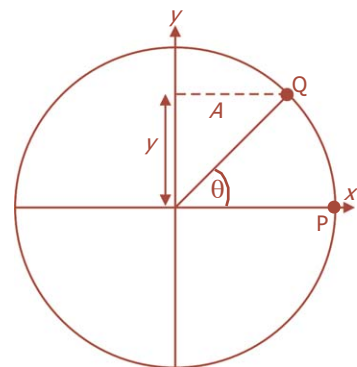
A = amplitudo (m)

T = periode (s)

ω = kecepatan sudut (rad/s)

t = waktu (s)

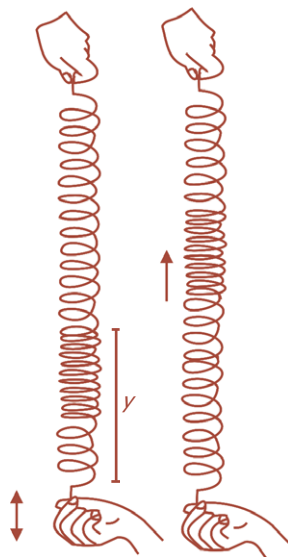
Fase gerak harmonik menyatakan keadaan gerak dalam hubungannya dengan simpangan dan arah getar. Jika suatu gerak harmonik kembali ke simpangan dan arah semula, maka gerak harmonik itu telah kembali ke fase semula.



Gambar 3.12 Gerak harmonik sederhana merupakan proyeksi titik P pada sumbu x .



Simpangan selalu berubah setiap waktu karena benda selalu mendekati atau menjauhi titik setimbang. Simpangan terbesar disebut amplitudo.



Gambar 3.13 Kecepatan gerak harmonik sederhana dipengaruhi oleh amplitudo.

Dari persamaan (3.12) diperoleh:

$$y = A \cdot \sin\left(\frac{2\pi t}{T} + \theta_0\right)$$

$$y = A \cdot \sin 2\pi\left(\frac{t}{T} + \frac{\theta_0}{2\pi}\right)$$

Atau $y = A \cdot \sin 2\pi\phi$, dengan ϕ adalah fase yang dituliskan dengan:

$$\phi = \left(\frac{t}{T} + \frac{\theta_0}{2\pi}\right) \dots\dots\dots (3.13)$$

Dua titik atau kedudukan dikatakan sefase jika beda fase sama dengan nol, dan dikatakan berlawanan fase jika beda setengah.

b. Kecepatan

Kecepatan gerak harmonik sederhana dapat ditentukan dari turunan persamaan simpangan.

$$y = A \cdot \sin(\omega t + \theta_0)$$

$$v = \frac{dy}{dt} = \frac{d}{dt} [A \sin(\omega t + \theta_0)]$$

$$v_y = \omega \cdot A \cdot \cos(\omega t + \theta_0) \dots\dots\dots (3.14)$$

Kecepatan gerak harmonik sederhana akan berharga maksimum jika fungsi cosinus bernilai maksimum, yaitu satu, sehingga:

$$v_{\text{maks}} = \omega \cdot A \dots\dots\dots (3.15)$$

Dari persamaan (3.14) kecepatan gerak harmonik dapat dinyatakan sebagai berikut:

$$\sin^2(\omega t + \theta_0) + \cos^2(\omega t + \theta_0) = 1, \text{ maka:}$$

$$\cos(\omega t + \theta_0) = \sqrt{1 - \sin^2(\omega t + \theta_0)}$$

sehingga persamaan (3.14) menjadi:

$$v = \omega \cdot A \sqrt{1 - \sin^2(\omega t + \theta_0)}$$

$$v = \omega \sqrt{A^2 - A^2 \sin^2(\omega t + \theta_0)}$$

karena:

$$y = A \cdot \sin(\omega t + \theta_0), \text{ maka:}$$

$$v = \omega \sqrt{A^2 - y^2} \dots\dots\dots (3.16)$$

c. Percepatan

Percepatan pada gerak harmonik sederhana dapat ditentukan dari turunan pertama persamaan kecepatan atau turunan kedua dari persamaan simpangan.

$$a_y = \frac{dv_y}{dt} = \frac{d}{dt} [\omega \cdot A \cdot \cos(\omega t + \theta_0)]$$

$$a_y = -\omega^2 \cdot A \cdot \sin(\omega t + \theta_0) \dots\dots\dots (3.17)$$


Karena $A \cdot \sin(\omega t + \theta_0) = y$, maka:

$$-a_y = -\omega^2 y \dots\dots\dots (3.18)$$

Percepatan akan bernilai maksimum jika fungsi sinus bernilai maksimum, yaitu satu, sehingga persamaan (3.15) menjadi:

$$a_{\text{maks}} = -\omega^2 A \dots\dots\dots (3.19)$$

Tanda negatif pada persamaan (3.17) dan (3.18) menunjukkan bahwa percepatan berlawanan dengan arah simpangannya.



Komet
Kolom mengingat

- Simpangan gerak harmonik sederhana:
 $y = A \cdot \sin \omega t$
- Kecepatan diturunkan dari rumus simpangan:
 $v = \omega A \cdot \cos \omega t$
- Percepatan diturunkan dari rumus kecepatan:
 $a = -\omega^2 \cdot A \cdot \sin \omega t$

Contoh Soal

Sebuah benda melakukan gerak harmonik sederhana dengan persamaan simpangan

$$y = 6 \sin \left(\Delta t + \frac{\pi}{3} \right), \text{ } y \text{ dalam meter dan } t \text{ dalam sekon. Tentukan:}$$

- a. amplitudo dan frekuensinya;
- b. simpangan, kecepatan, dan percepatan saat $t = \frac{\pi}{4}$ sekon!

Penyelesaian:

Diketahui: $y = 6 \sin \left(\Delta t + \frac{\pi}{3} \right)$
 $t = \frac{\pi}{4}$ sekon

Ditanya:

- a. A dan $f = \dots ?$
- b. $y, v, a = \dots ?$

Jawab:

a. $y = A \sin(\omega t + \theta_0)$

$$y = 6 \sin \left(4t + \frac{\pi}{3} \right)$$

Dari dua persamaan tersebut, diperoleh:

- a) amplitudo (A) = 6 m
- b) kecepatan sudut (ω) = 4 rad/s

$$\omega = 2\pi f$$

$$4 = 2\pi f$$

$$f = \frac{4}{2\pi}$$

$$= \frac{2}{\pi} \text{ Hz}$$

b. Simpangan $y = 6 \sin (4t + \frac{\pi}{3})$
 untuk $t = \frac{\pi}{4} \rightarrow y = 6 \sin (4\frac{\pi}{4} + \frac{\pi}{3})$
 $y = 6 \sin (\pi + \frac{\pi}{3}) = 6 (-\frac{1}{2}\sqrt{3}) = -3\sqrt{3} \text{ m}$
 $v = \frac{d}{dt}[A \sin(\omega t + \theta_0)] = \frac{d}{dt}\left[6 \sin(4t + \frac{\pi}{3})\right] = 24 \cos(4t + \frac{\pi}{3})$
 Untuk $t = \frac{\pi}{4} \rightarrow v = 24 \cos(4\frac{\pi}{4} + \frac{\pi}{3}) = 24 \cos(\pi + \frac{\pi}{3}) = 24 \cos(4\frac{\pi}{3})$
 $v = 24 (-\frac{1}{2}) = -12 \text{ m/s}$
 Percepatan, $a = \frac{dv_y}{dt} = \frac{d}{dt}\left[24 \cos(4t + \frac{\pi}{3})\right] = -96 \sin(4t + \frac{\pi}{3})$
 Untuk $t = \frac{\pi}{4} \rightarrow a = -96 \sin(4\frac{\pi}{4} + \frac{\pi}{3})$
 $= -96 \sin(\pi + \frac{\pi}{3})$
 $= -96 \sin(4\frac{\pi}{3})$
 $= -96 (\frac{1}{2}\sqrt{3}) = -48\sqrt{3} \text{ m/s}^2$



Pegas dapat digunakan untuk menyimpan energi. Energi ini dapat dilepaskan dengan cepat dan pelan-pelan sehingga pegas kembali ke keadaan semula.

d. Energi Gerak Harmonik Sederhana

Benda yang melakukan gerak harmonik sederhana memiliki energi potensial dan energi kinetik. Jumlah energi potensial dan energi kinetik disebut energi mekanik.

Besarnya energi potensial adalah energi yang dimiliki gerak harmonik sederhana karena simpangannya. Secara matematis dituliskan:

$$Ep = \frac{1}{2}ky^2$$

Karena: $y = A \cdot \sin \omega t$, maka:

$$Ep = \frac{1}{2}k \cdot A^2 \cdot \sin^2 \omega t \dots\dots\dots (3.20)$$

Energi kinetik adalah energi yang dimiliki oleh benda yang melakukan gerak harmonik sederhana karena kecepatannya. Secara matematis dituliskan:

$$Ek = \frac{1}{2}m \cdot v^2$$

$$Ek = \frac{1}{2}m \cdot \omega^2 \cdot A^2 \cdot \cos^2 \omega t$$

karena $m \omega^2 = k$, maka:

$$Ek = \frac{1}{2}k \cdot A^2 \cdot \cos^2 \omega t \dots\dots\dots (3.21)$$

Besarnya energi mekanik adalah:

$$\begin{aligned} E_m &= E_p + E_k \\ &= \frac{1}{2} k A^2 \sin^2 \omega t + \frac{1}{2} k A^2 \cos^2 \omega t \\ &= \frac{1}{2} k A^2 (\sin^2 \omega t + \cos^2 \omega t) \end{aligned}$$

karena $\sin^2 \omega t + \cos^2 \omega t = 1$, maka:

$$E_m = \frac{1}{2} k A^2$$

Besarnya energi mekanik dari suatu benda yang melakukan gerak harmonik sederhana adalah tetap, sehingga berlaku kekekalan energi mekanik yang dapat dituliskan:

$$E_{m_1} = E_{m_2}$$

$$E_{p_1} + E_{k_1} = E_{p_2} + E_{k_2}$$

$$\frac{1}{2} k y_1^2 + \frac{1}{2} m v_1^2 = \frac{1}{2} k y_2^2 + \frac{1}{2} m v_2^2 \dots\dots\dots (3.22)$$

Pada gerak harmonik sederhana, energi potensial akan minimum saat simpangannya minimum ($y = 0$) dan maksimum saat simpangannya maksimum ($y = A$). Sementara itu, energi kinetik akan minimum saat simpangan maksimum ($y = A$) dan maksimum saat simpangannya minimum ($y = 0$).

Energi potensial elastis pegas

Untuk meregangkan pegas sepanjang x diperlukan gaya sebesar F untuk menarik pegas tersebut. Energi potensial pegas adalah besarnya gaya pegas untuk meregangkan sepanjang x . Berdasarkan Hukum Hooke, dapat diketahui grafik hubungan antara gaya F dengan pertambahan panjang x seperti Gambar 3.15. Besarnya usaha merupakan luasan yang diarsir.

$$E_p = W = \text{luas } \triangle OAB$$

$$= \frac{1}{2} Fx$$

karena $F = kx$, maka:

$$E_p = \frac{1}{2} (kx)x$$

$$E_p = \frac{1}{2} kx^2 \dots\dots\dots (3.23)$$

dengan:

E_p = energi potensial pegas (J)

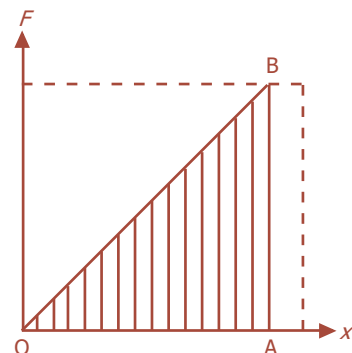
k = konstanta gaya pegas (N/m)

x = pertambahan panjang pegas (m)



Sumber: *Ensiklopedi Umum untuk Pelajar*, PT Ichtiar Baru van Hoeve, 2005

Gambar 3.14 Energi potensial tali busur ketika seseorang menarik tali busur panah.



Gambar 3.15 Grafik gaya terhadap pertambahan panjang.

Contoh Soal

1. Sebuah benda melakukan gerak harmonik sederhana dengan amplitudo $\sqrt{3}$ cm. Energi kinetik di titik setimbang 20 joule. Tentukan besar energi potensial benda pada saat kecepatannya setengah harga maksimumnya!

Penyelesaian:

$$\text{Diketahui: } A = \sqrt{3} \text{ cm} = \sqrt{3} \times 10^{-2} \text{ m}$$

$$Ek_{\text{maks}} = 20 \text{ J}$$

$$v = \frac{1}{2} v_{\text{maks}}$$

$$\text{Ditanya: } Ep = \dots ?$$

Jawab:

$$Ek_{\text{maks}} = Em = 20 \text{ J}$$

$$Ek = \frac{1}{2} m.v^2$$

$$\text{karena } v = \frac{1}{2} v_{\text{maks}}, \text{ maka:}$$

$$Ek = \frac{1}{4} Ek_{\text{maks}}$$

$$Ek = \frac{1}{4} (20 \text{ J}) = 5 \text{ J}$$

$$\text{saat } v = \frac{1}{2} v_{\text{maks}}$$

$$Ep + Ek = Em$$

$$Ep + 5 \text{ J} = 20 \text{ J}$$

$$Ep = 15 \text{ J}$$

2. Sebuah pegas menggantung dalam keadaan normal, panjangnya 40 cm. Ketika pada ujungnya diberi beban 200 gram, panjangnya menjadi 50 cm. Jika pegas ditarik sepanjang 5 cm, hitunglah energi potensial elastis pegas! ($g = 10 \text{ m/s}^2$)

Penyelesaian:

$$\text{Diketahui: } x = 40 \text{ cm}$$

$$x_1 = (50 - 40) \text{ cm} = 10 \text{ cm} = 0,1 \text{ m}$$

$$x_2 = 5 \text{ cm} = 5 \times 10^{-2} \text{ m}$$

$$m = 200 \text{ g} = 0,2 \text{ kg}$$

$$\text{Ditanya: } Ep = \dots ?$$

Jawab:

$$F = m.g = 0,2 \text{ kg} \times 10 \text{ m/s}^2 = 2 \text{ N}$$

$$F = k.x_1$$

$$2 \text{ N} = k \times 0,1 \text{ m}$$

$$k = 20 \text{ N/m}$$

Pada saat $x = 5 \text{ cm}$, maka:

$$Ep = \frac{1}{2} k.x^2$$

$$= \frac{1}{2} (20)(5 \times 10^{-2})^2 = 25 \times 10^{-3} = 2,5 \times 10^{-2} \text{ J}$$

Uji Kemampuan 3.4

1. Ketika Raditya yang bermassa 60 kg naik sepeda motor, maka jok turun 5 cm. *Shockbreaker* pada sepeda motor dianggap sebagai pegas. Jika adiknya yang bermassa 35 kg membonceng, berapakah energi potensial pada sepeda motor tersebut?
2. Sebuah pegas melakukan gerak harmonik sederhana dengan persamaan simpangan $y = 15 \sin(2t + \frac{\pi}{6})$. Tentukan kecepatannya saat $t = \frac{\pi}{2}$ sekon!

Fiesta

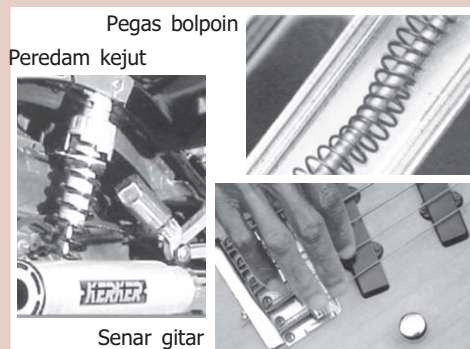
Fisikawan Kita



Thomas Young

Ia lahir di Milverton, Somerset, Inggris pada tanggal 13 Juni 1773 dan meninggal di London pada tanggal 10 Mei 1829. Ia termasuk anak ajaib, pada umur 2 tahun sudah dapat membaca dengan lancar. Sebelum masuk perguruan tinggi ia belajar bahasa Yunani, Latin, Ibrani, Arab, Turki, dan Etiopia. Sampai dewasa pun, ia tetap seorang ajaib dan dapat membiayai hidup dan kuliahnya sendiri. Ia kuliah di Universitas Edinburgh, kemudian melanjutkan di Jerman dan mendapat gelar dari Universitas Göttingen pada umur 23 tahun. Ketika ia membuktikan bahwa cahaya adalah gelombang dengan interferensinya, hampir semua ilmuwan di Inggris menentanginya karena dituduh tidak ilmiah.

Percikan Fisika



Penggunaan Pegas

Sifat pegas banyak digunakan dalam kehidupan sehari-hari, misalnya pada neraca pegas; pegas pada kendaraan bermotor, yaitu pegas sebagai peredam kejut pada saat roda kendaraan melalui jalan yang tidak rata; dan penggerak mesin jam atau arloji. Senar gitar atau bas akan bergetar saat dipetik, karena senar juga termasuk pegas. Pegas dalam bolpoin digunakan untuk mengeluarkan dan memasukkan isi tinta.

- ✳ Elastisitas adalah kemampuan suatu benda untuk kembali ke bentuk awalnya segera setelah gaya luar yang diberikan kepadanya dihilangkan. Benda yang memiliki elastisitas disebut *benda elastis*, sedangkan benda yang tidak memiliki elastisitas disebut *benda plastis*.

- ✳ Tegangan (*stress*) didefinisikan sebagai perbandingan antara gaya yang bekerja pada benda dengan luas penampang benda.

$$\sigma = \frac{F}{A}$$

- ✳ Regangan (*strain*) adalah perbandingan antara pertambahan panjang dengan panjang mula-mula.

$$e = \frac{\Delta L}{L}$$

- ✳ Modulus elastisitas atau modulus Young adalah perbandingan antara tegangan dan regangan: $E = \frac{\sigma}{e} = \frac{F.L}{A.\Delta L}$.

- ✳ Menurut Hukum Hooke, besarnya pertambahan panjang benda pada daerah elastisitas sebanding dengan gaya yang bekerja pada benda: $F = k.x$.

- ✳ Periode adalah waktu yang diperlukan untuk satu siklus gerak harmonik yang besarnya: $T = 2\pi\sqrt{\frac{m}{k}}$.

- ✳ Frekuensi adalah jumlah siklus gerak harmonik yang terjadi tiap satuan waktu.

$$f = \frac{1}{T} = \frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{k}{m}}$$

- ✳ Simpangan pada grafik harmonik sederhana dinyatakan:

$$y = A \sin \theta ; y = A \sin \omega t = A \sin \frac{2\pi t}{T}$$

- ✳ Kecepatan pada gerak harmonik merupakan turunan pertama dari persamaan simpangan: $v_y = \omega.A \cos(\omega t + \theta_0)$.

- ✳ Percepatan merupakan turunan pertama dari persamaan kecepatan.

$$a_y = -\omega^2.A \sin(\omega t + \theta_0)$$

- ✳ Benda yang melakukan gerak harmonik memiliki energi potensial dan energi kinetik yang besarnya:

$$Ep = \frac{1}{2}k.A^2 \sin^2 \omega t ; Ek = \frac{1}{2}k.A^2 \cos^2 \omega t$$

- ✳ Energi mekanik adalah jumlah energi potensial dan energi kinetik.

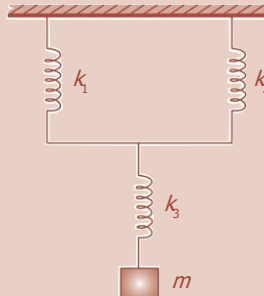
$$Em = Ep + Ek = \frac{1}{2}k.A^2$$

- ✳ Energi potensial elastis pegas adalah usaha gaya pegas untuk meregangkan pegas sepanjang x , dirumuskan: $Ep = W = \frac{1}{2}k.x^2$.

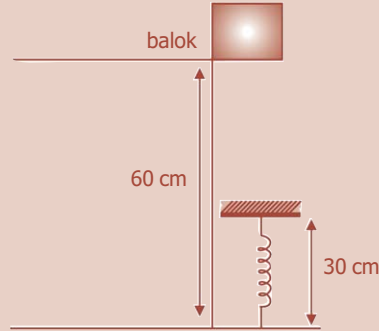
Uji Kompetensi

A. Pilihlah jawaban yang paling tepat!

1. Dimensi dari modulus elastisitas adalah
 - a. $ML^{-2}T^{-2}$
 - b. MLT^{-2}
 - c. $ML^{-1}T^{-1}$
 - d. $ML^{-1}T^{-2}$
 - e. $ML^{-1}T^2$
2. Modulus Young aluminium adalah 7×10^{10} Pa. Gaya yang diperlukan untuk menarik seutas kawat aluminium dengan garis tengah 2 mm yang panjangnya 600 mm menjadi 800 mm adalah
 - a. 733.000 N
 - b. 659.400 N
 - c. 73.600 N
 - d. 73.267 N
 - e. 65.940 N
3. Sebuah pegas akan bertambah panjang 5 cm jika diberikan gaya sebesar 10 N. Pertambahan panjang pegas jika gaya yang diberikan sebesar 16 N adalah
 - a. 4 cm
 - b. 6 cm
 - c. 8 cm
 - d. 10 cm
 - e. 12 cm
4. Dua pegas identik dirangkai paralel dengan konstanta gaya pegas 100 N/m. Jika pada ujung susunan pegas diberi beban 1 kg dan $g = 10 \text{ m/s}^2$, maka pertambahan panjang pegas adalah
 - a. 1 m
 - b. 2 m
 - c. 3 m
 - d. 4 m
 - e. 5 cm
5. Untuk meregangkan sebuah pegas sepanjang 4 cm diperlukan energi sebesar 0,16 J. Untuk meregangkan pegas sepanjang 2 cm, diperlukan gaya
 - a. 0,8 N
 - b. 1,6 N
 - c. 2 N
 - d. 3,2 N
 - e. 4 N
6. Tiga buah pegas disusun seperti gambar di bawah ini. Konstanta masing-masing $k_1 = 200 \text{ N/m}$, $k_2 = 400 \text{ N/m}$, $k_3 = 200 \text{ N/m}$. Karena pengaruh beban m , susunan pegas mengalami pertambahan panjang 5 cm. Jika $g = 10 \text{ m/s}^2$, besarnya m adalah
 - a. 16,6 kg
 - b. 7,5 kg
 - c. 3,33 kg
 - d. 1,67 kg
 - e. 0,75 kg



7. Sebuah balok jatuh dari meja yang tingginya 60 cm dari lantai. Balok yang jatuh tepat di ujung pegas yang memiliki tetapan $2,4 \times 10^3 \text{ N/m}$. Tinggi pegas mula-mula 30 cm dan menjadi 10 cm ketika terkena balok. Massa balok adalah ($g = 10 \text{ m/s}^2$)



- 11,2 kg
 - 9,6 kg
 - 8,4 kg
 - 7,2 kg
 - 6,3 kg
8. Sebuah partikel melakukan gerak harmonik sederhana dengan frekuensi 5 Hz dan amplitudo 10 cm. Kecepatan partikel pada saat berada pada simpangan 8 cm adalah
- $30 \pi \text{ cm/s}$
 - $60 \pi \text{ cm/s}$
 - $72 \pi \text{ cm/s}$
 - $80 \pi \text{ cm/s}$
 - $95 \pi \text{ cm/s}$
9. Pada saat energi kinetik benda yang melakukan gerak harmonik sederhana sama dengan energi potensialnya, maka
- sudut fasenya 180°
 - fasenya $\frac{3}{4}$
 - sudut fasenya 45°
 - fasenya $\frac{1}{4}$
 - percepatannya nol
10. Sebuah benda diikat pada ujung suatu pegas dan bergerak harmonik dengan amplitudo A dan konstanta pegas k . Pada saat simpangan benda $0,4A$, maka energi kinetik benda adalah
- $\frac{1}{8} k.A^2$
 - $\frac{1}{4} k.A^2$
 - $\frac{3}{8} k.A^2$
 - $\frac{1}{2} k.A^2$
 - $\frac{3}{4} k.A^2$

B. Jawablah dengan singkat dan benar!

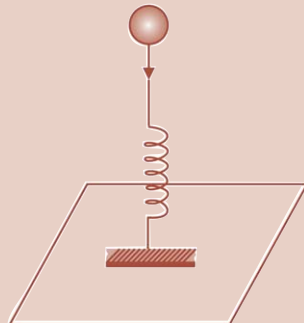
1. Kawat panjangnya 120 cm memiliki luas penampang 8 mm^2 . Sebuah beban 40 N diberikan pada kawat tersebut dan ternyata kawat memanjang 0,4 mm. Tentukan:
 - a. tegangan kawat,
 - b. regangan kawat, dan
 - c. modulus elastisitas kawat!

2.



Tiga buah pegas masing-masing dengan konstanta gaya 200 N/m, 300 N/m, dan 600 N/m disusun seri dan diberi beban 25 N. Berapakah pertambahan panjang susunan pegas tersebut?

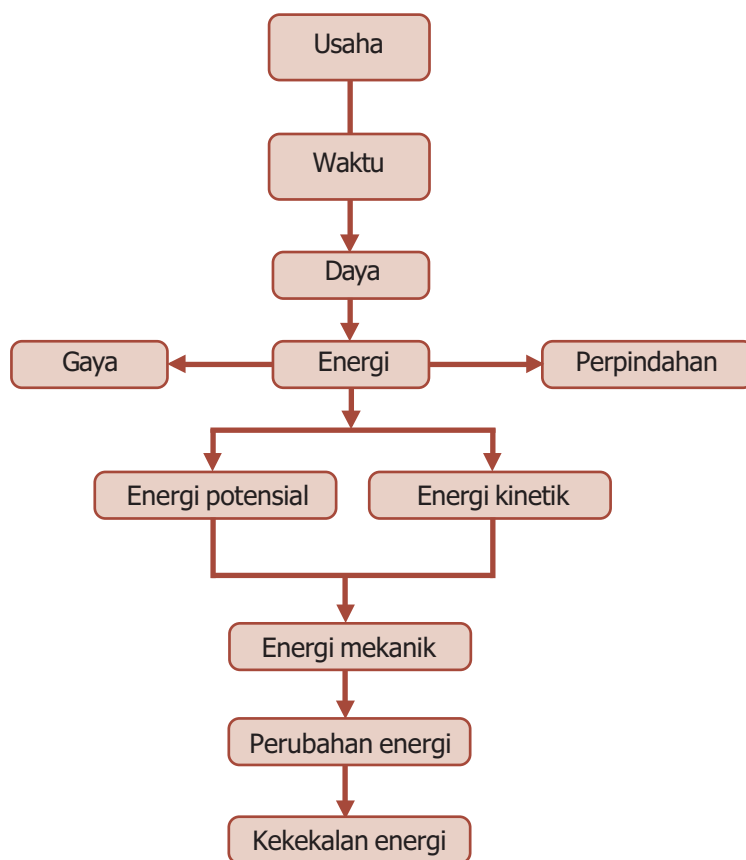
3. Bola dengan massa 0,5 kg dijatuhkan tanpa kecepatan awal dari ketinggian 2 m di atas pegas. Setelah tertimpa benda, pegas mampat sejauh 20 cm. Jika $g = 10 \text{ m/s}^2$, tentukan konstanta pegas tersebut!



4. Sebuah benda bermassa 5 gram bergerak harmonik sederhana dengan persamaan simpangan $y = 0,04 \sin 100t$, y dalam meter dan t dalam sekon. Tentukan:
 - a. frekuensi,
 - b. amplitudo,
 - c. energi total!
5. Sebuah benda massanya 100 gram bergetar harmonik dengan periode $1/5$ sekon dan amplitudo 2 cm. Tentukan besar energi kinetik benda pada saat simpangan 1 cm!

PETA KONSEP

Bab 4 Usaha dan Energi



BAB

4

USAHA DAN ENERGI



- Orang mendorong mobil dikatakan melakukan usaha.

Sumber: *Dokumen Penerbit*, 2006

Pada saat kita mendorong mobil maka dapat dikatakan kita melakukan usaha terhadap mobil. Tanpa kita pedulikan apakah mobil bergerak atau tidak, kita sudah melakukan usaha. Adapun kerja atau energi merupakan kemampuan untuk melakukan usaha. Dalam hal ini energi adalah tenaga yang kita keluarkan untuk mendorong mobil tersebut. Jadi apakah yang dimaksud dengan usaha dan energi? Untuk lebih memahaminya ikutilah pembahasan berikut ini.

Kata Kunci

daya, energi,
energi kinetik,
energi potensial, gaya,
kecepatan, perpindahan,
usaha

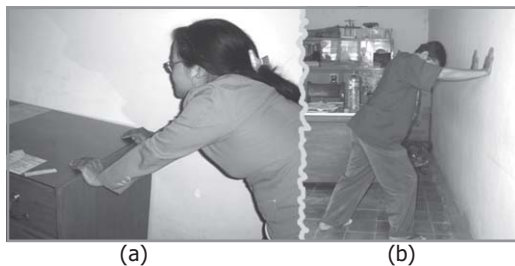
Kalian tentu sering mendengar istilah usaha dan energi. Apa yang kalian ketahui tentang usaha? Apa pula pengertian energi? Usaha memiliki kaitan yang erat dengan energi. Hanya benda yang memiliki energi yang dapat melakukan usaha. Pada saat usaha dilakukan terjadilah perubahan energi.

Usaha atau kerja sering diartikan sebagai upaya untuk mencapai tujuan, misalnya usaha untuk menjadi juara kelas, usaha untuk memenangkan lomba balap sepeda, dan usaha untuk mencapai finis dalam lomba lari. Selama orang melakukan kegiatan maka dikatakan dia berusaha, tanpa mempedulikan tercapai atau tidak tujuannya.

Pengertian usaha dalam fisika hampir sama dengan pengertian dalam kehidupan sehari-hari, keduanya merupakan kegiatan dengan mengerahkan tenaga. Energi adalah kemampuan untuk melakukan usaha. Ada bermacam-macam bentuk energi yang dapat diubah menjadi bentuk energi yang lain. Dalam setiap perubahan bentuk energi, tidak ada energi yang hilang, karena energi bersifat kekal sehingga tidak dapat diciptakan atau dimusnahkan.



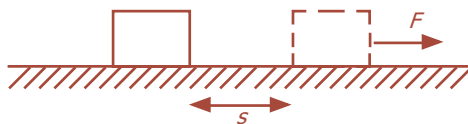
A. Usaha



Sumber: Dokumen Penerbit, 2006

Gambar 4.1 Seseorang yang sedang melakukan usaha: (a) mendorong meja, (b) mendorong dinding.

Pada saat kita mendorong sebuah meja dengan gaya tertentu, ternyata meja bergerak. Akan tetapi, ketika kita mendorong tembok dengan gaya yang sama, ternyata tembok tetap diam. Dalam pengertian sehari-hari keduanya dianggap sebagai usaha, tanpa memerhatikan benda tersebut bergerak atau diam.



Gambar 4.2 Usaha yang dilakukan oleh gaya F .

Dalam fisika, usaha memiliki pengertian khusus untuk mendeskripsikan apa yang dihasilkan oleh gaya ketika bekerja pada benda sehingga benda bergerak pada jarak tertentu. Usaha yang dilakukan oleh gaya didefinisikan sebagai hasil kali komponen gaya yang segaris dengan perpindahan dengan besarnya perpindahan. Gambar 4.2. menunjukkan gaya F yang bekerja pada benda yang terletak pada bidang horizontal sehingga benda berpindah sejauh s .

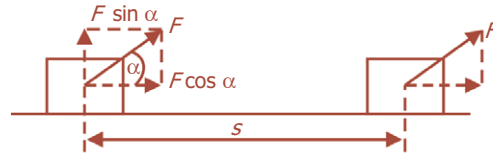
Besarnya komponen gaya yang sejaris atau searah dengan perpindahan adalah $F = F \cos \alpha$, sehingga besarnya usaha dirumuskan:

$$W = F \cdot s$$

$$W = F \cos \alpha \cdot s = F \cdot s \cdot \cos \alpha \quad \dots\dots\dots (4.1)$$

dengan:

- W = usaha (J)
- F = gaya (N)
- s = perpindahan (m)
- α = sudut antara F dengan s



Gambar 4.3 Usaha yang ditentukan sudut antara gaya dengan perpindahan benda.

Berdasarkan persamaan (4.1), besarnya usaha yang dilakukan oleh gaya ditentukan oleh besarnya sudut antara arah gaya dengan perpindahan benda. Berikut ini beberapa keadaan istimewa yang berhubungan dengan arah gaya dan perpindahan benda.

- a. Jika $\alpha = 0^\circ$, berarti gaya F searah dengan arah perpindahan.
Karena $\cos 0^\circ = 1$, maka usaha yang dilakukan: $W = F \cdot s$.
- b. Jika $\alpha = 90^\circ$, berarti gaya F tegak lurus dengan arah perpindahan.
Karena $\cos 90^\circ = 0$, maka: $W = 0$.
Dikatakan bahwa gaya tidak menghasilkan usaha.
- c. Jika $\alpha = 180^\circ$, berarti gaya F berlawanan dengan arah perpindahan.
Karena $\cos 180^\circ = -1$, maka: $W = -F \cdot s$.
- d. Jika $s = 0$, berarti gaya tidak menyebabkan benda berpindah, maka: $W = 0$.

1. Usaha oleh Beberapa Gaya

Gambar 4.4 menunjukkan sebuah benda yang dipengaruhi oleh gaya F_1 dan F_2 yang bertitik tangkap sama, sehingga benda bergeser sejauh s pada arah horizontal.

Komponen gaya F_1 yang searah dengan perpindahan adalah:

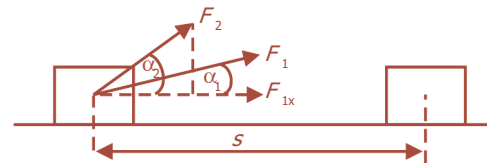
$$F_{1x} = F_1 \cdot \cos \alpha_1, \text{ sehingga:}$$

$$W_1 = F_{1x} \cdot s = F_1 \cdot s \cdot \cos \alpha_1$$

Komponen gaya F_2 yang searah dengan perpindahan adalah:

$$F_{2x} = F_2 \cdot \cos \alpha_2, \text{ sehingga:}$$

$$W_2 = F_{2x} \cdot s = F_2 \cdot s \cdot \cos \alpha_2$$



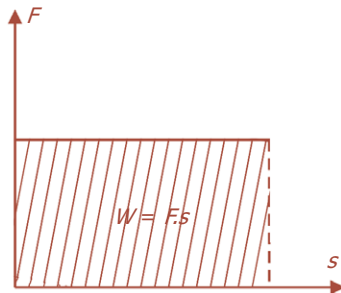
Gambar 4.4 Usaha yang dilakukan oleh dua gaya, F_1 dan F_2 .

Karena usaha adalah besaran skalar, maka usaha yang dilakukan oleh beberapa gaya bertitik tangkap sama merupakan jumlah aljabar dari usaha yang dilakukan masing-masing gaya.

$$W = W_1 + W_2 + \dots + W_n \dots \dots \dots (4.2)$$

2. Grafik Gaya terhadap Perpindahan

Apabila benda dipengaruhi oleh gaya yang konstan (besar dan arahnya tetap), maka grafik antara gaya F dan perpindahan s dapat digambarkan dengan Gambar 4.5. Usaha yang dilakukan oleh gaya F selama perpindahan sama dengan luas daerah yang diarsir. Usaha bernilai positif jika luas daerah yang diarsir berada di atas sumbu s , dan akan bernilai negatif jika luas daerah yang diarsir berada di bawah sumbu s .



Gambar 4.5 Grafik gaya terhadap perpindahan.

Contoh Soal

- Sebuah benda dengan massa 50 kg ditarik sejauh 40 m sepanjang lantai horizontal dengan gaya tetap 100 N dan membentuk sudut 37° terhadap arah mendatar. Jika gaya gesek terhadap lantai 50 N, maka tentukan usaha yang dilakukan oleh masing-masing gaya!

Penyelesaian:

Diketahui: $F = 100 \text{ N}$
 $\alpha_1 = 37^\circ$
 $F_y = 50 \text{ N}$
 $s = 40 \text{ m}$

Ditanya: $W = \dots ?$

Jawab:

Usaha yang dilakukan oleh F adalah:

$$\begin{aligned} W_1 &= F_1 \cdot s \cdot \cos \alpha_1 \\ &= 100 \times 40 \times \cos 37^\circ \\ &= 3.200 \text{ J} \end{aligned}$$

Usaha yang dilakukan oleh gaya gesek F_y adalah:

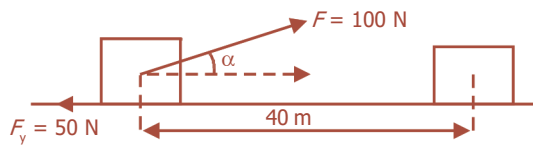
$$\begin{aligned} W_2 &= F_y \cdot s \cdot \cos \alpha_2 \\ &= 50 \times 40 \times \cos 180^\circ = -2.000 \text{ J} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} W_t &= W_1 + W_2 \\ &= 3.200 \text{ J} - 2.000 \text{ J} = 1.200 \text{ J} \end{aligned}$$

atau dengan cara:

$$\begin{aligned} \sum F_x &= F \cdot \cos \alpha_1 - F_y \\ &= 100 \cdot \cos 37^\circ - 50 \text{ N} = 30 \text{ N} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} W &= \sum F_x \cdot s \\ &= 30 \text{ N} \times 40 \text{ m} = 1.200 \text{ J} \end{aligned}$$



2. Perhatikan grafik gaya F terhadap perpindahan s di samping.

Tentukan usaha total yang dilakukan oleh gaya!

Penyelesaian:

Usaha = luas daerah di bawah grafik

W_1 = luas trapesium

$$= (10 + 6) \times \frac{1}{2} \times 8 = 64 \text{ J}$$

W_2 = luas segitiga

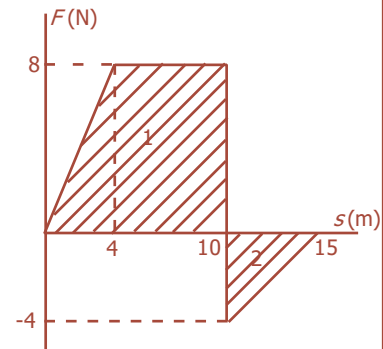
$$= \frac{1}{2} \times (-4) \times 5$$

$$= -10 \text{ J}$$

Besarnya usaha total:

$$W_{\text{tot}} = W_1 + W_2$$

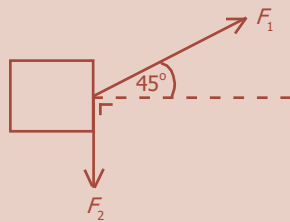
$$= (64 - 10) \text{ J} = 54 \text{ J}$$



Uji Kemampuan 4.1

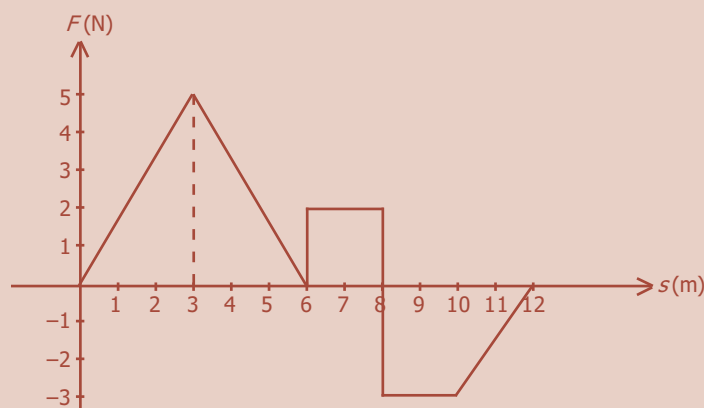
1. Sebuah gaya konstan sebesar 28 N dikenakan pada benda, sehingga benda berpindah sejauh 15 m. Hitung usaha yang dikenakan oleh gaya tersebut bila sudut antara gaya dan perpindahan 60° !

2. Perhatikan gambar di samping!



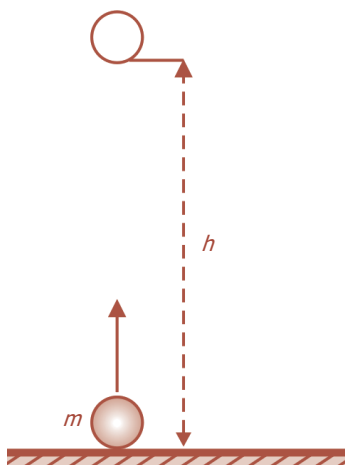
Jika besarnya $F_1 = 150 \text{ N}$ dan $F_2 = 30 \text{ N}$, kotak tersebut berpindah sejauh 8 m. Berapa besarnya usaha total?

3. Hitunglah usaha yang dilakukan gaya F terhadap perpindahan s seperti yang ditunjukkan grafik berikut!





B. Energi



Gambar 4.6 Energi potensial gravitasi benda pada ketinggian h .

Kata energi berasal dari bahasa Yunani, yaitu *ergon* yang berarti “kerja”. Jadi, energi didefinisikan sebagai kemampuan untuk melakukan kerja atau usaha. Energi merupakan sesuatu yang sangat penting dalam kehidupan di alam ini, terutama bagi kehidupan manusia, karena segala sesuatu yang kita lakukan memerlukan energi.

Energi di alam ini tersedia dalam berbagai bentuk, misalnya energi kimia, energi listrik, energi kalor, dan energi cahaya. Energi akan bermanfaat jika terjadi perubahan bentuk dari suatu bentuk energi ke bentuk lain. Sebagai contoh setrika listrik akan bermanfaat jika terjadi perubahan energi listrik menjadi energi kalor.

1. Energi Potensial Gravitasi

Energi potensial gravitasi adalah energi yang dimiliki oleh benda karena kedudukan atau ketinggiannya. Energi potensial merupakan energi yang masih tersimpan atau tersembunyi pada benda, sehingga mempunyai potensi untuk melakukan usaha. Misalnya, sebuah benda dengan massa m diangkat dari permukaan tanah sampai ketinggian h dari tanah (Gambar 4.6).

Apabila percepatan gravitasi bumi g , maka gaya yang diperlukan untuk mengangkat benda adalah $F = W = mg$. Jadi, usaha yang diperlukan untuk mengangkat benda setinggi h adalah:

$$W = Fh$$

$$W = m \cdot g \cdot h$$

Dengan demikian, benda yang berada pada ketinggian h mempunyai potensi untuk melakukan usaha sebesar $W = m \cdot g \cdot h$. Dikatakan benda tersebut mempunyai energi potensial gravitasi, yang besarnya:

$$Ep = m \cdot g \cdot h \dots\dots\dots (4.3)$$

dengan:

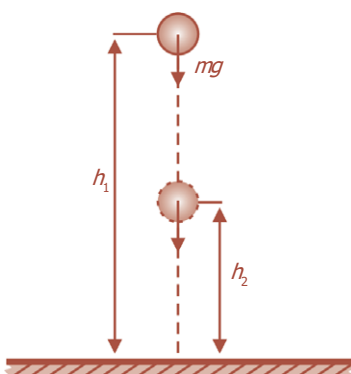
Ep = energi potensial gravitasi (J)

m = massa benda (kg)

g = percepatan gravitasi (m/s^2)

h = ketinggian benda (m)

Apabila benda mula-mula berada pada ketinggian h_1 , karena gaya beratnya benda bergerak vertikal ke bawah hingga ketinggian h_2 dari bidang acuan (Gambar 4.7).



Gambar 4.7 Energi potensial benda yang mula-mula berada pada ketinggian h_1 .

Besarnya usaha yang dilakukan oleh gaya berat adalah:

$$W = m \cdot g \cdot h_1 - m \cdot g \cdot h_2$$

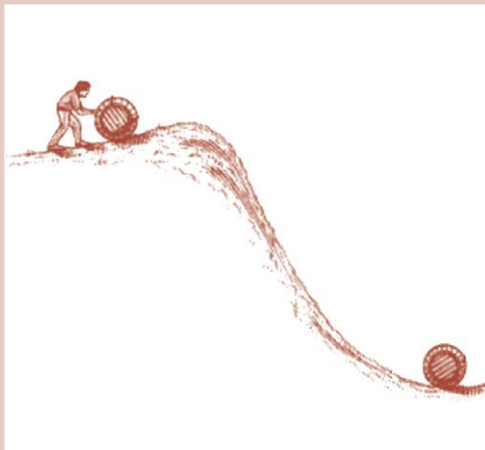
$$W = m \cdot g \cdot (h_1 - h_2)$$

$$= -m \cdot g \cdot (h_2 - h_1)$$

$$W = -\Delta Ep \dots\dots\dots (4.4)$$

Sehingga usaha yang dilakukan oleh gaya berat merupakan selisih perubahan energi potensial benda tersebut.

Percikan Fisika



Bukit potensial

Energi dibutuhkan untuk menggerakkan benda apa pun melawan gaya tarik bumi (gravitasi), yang berusaha menarik benda ke bawah. Untuk membawa sebuah tong ke puncak bukit, diperlukan energi otot untuk mengangkatnya. Di bukit seperti inilah, tong menyimpan energi potensial karena ketinggiannya. Dan sewaktu-waktu tong siap melepaskan energi potensialnya. Ketika tong menggelinding menuruni bukit, ia berangsur-angsur kehilangan energi potensialnya, sehingga pada saat mencapai kaki bukit habislah energi potensial yang tersimpan.

2. Energi Kinetik

Setiap benda yang sedang bergerak memiliki kemampuan untuk melakukan usaha. Dengan demikian benda dikatakan mempunyai energi, yaitu energi gerak atau energi kinetik. Energi kinetik adalah energi yang dimiliki oleh benda karena geraknya. Semakin cepat benda bergerak, maka semakin besar energi kinetik yang dimilikinya. Sebagai contoh, sebuah bus yang bermassa m mula-mula dalam keadaan diam, karena dipengaruhi gaya konstan F , bus bergerak dipercepat beraturan dengan kecepatan v hingga berpindah sejauh s . Hal ini menunjukkan bahwa mesin bus telah menyebabkan perubahan energi kinetik pada bus tersebut.

Benda bermassa m bergerak dengan kecepatan v yang dikenai gaya F menyebabkan benda berpindah sejauh s . Usaha yang dilakukan oleh gaya konstan adalah:

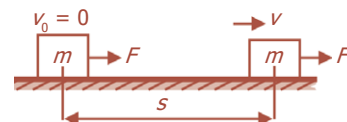
$$W = F \cdot s$$

Berdasarkan Hukum II Newton, $F = m \cdot a$ dan pada gerak lurus berubah beraturan untuk kecepatan awal sama dengan nol ($v_0 = 0$), maka $v^2 = 2a \cdot s$, sehingga besarnya usaha:

Komet

Kolom mengingat

Energi kinetik paling besar terjadi jika energi potensialnya paling kecil, dan sebaliknya, karena jumlah energi kinetik dan energi potensial (disebut energi mekanik) harus tetap.



Gambar 4.8 Benda bermassa m bergerak dengan kecepatan v yang dikenai gaya F menyebabkan benda berpindah sejauh s .

$$W = (m \cdot a) \left(\frac{v^2}{2a} \right)$$

$$W = \frac{1}{2} m \cdot v^2$$

W adalah usaha yang diperlukan oleh gaya F untuk mengubah kecepatan benda. Besarnya usaha ini sama dengan energi kinetik yang dimiliki benda pada saat kecepatannya v . Dengan demikian, energi kinetik dapat dinyatakan:

$$Ek = \frac{1}{2} m v^2 \dots\dots\dots (4.5)$$

dengan:

Ek = energi kinetik (J)

m = massa benda (kg)

v = kecepatan benda (m/s)

Usaha yang dilakukan untuk mengubah kecepatan benda dari v_1 menjadi v_2 sama dengan perubahan energi kinetik yang dialami benda tersebut.

$$\begin{aligned} W &= Ek_2 - Ek_1 = \frac{1}{2} m \cdot v_2^2 - \frac{1}{2} m \cdot v_1^2 \\ &= \frac{1}{2} m (v_2^2 - v_1^2) \dots\dots\dots (4.6) \end{aligned}$$

Percikan Fisika



Memalu Paku

Energi kinetik dimiliki oleh benda yang bergerak. Kepala palu memiliki energi kinetik yang besar ketika dipukulkan ke paku. Begitu mengenai sasaran, palu kehilangan seluruh energi geraknya, tetapi energi ini tidaklah hilang, melainkan berpindah ke atom dan molekul paku, kayu, udara, dan bahkan ke palu sendiri. Energi kinetik/energi gerak kini berubah menjadi energi panas. Jadi, disini berlaku hukum kekekalan energi.

Contoh Soal

1. Sebuah bola dengan massa 0,5 kg dilemparkan vertikal ke atas dengan kecepatan 20 m/s. Jika percepatan gravitasi 10 m/s², tentukan:
 - a. energi potensial saat mencapai titik tertinggi, dan
 - b. perubahan energi potensial saat bola berada pada ketinggian 5 m!

Penyelesaian:

Diketahui: $m = 0,5 \text{ kg}$

$$v_0 = 20 \text{ m/s}$$

$$g = 10 \text{ m/s}^2$$

Ditanya: a. $E_p = \dots ?$

b. $\Delta E_p = \dots ?$

Jawab:

$$\text{a. } h_{\text{maks}} = \frac{v_0^2}{2g} = \frac{20^2}{2 \times 10} = 20 \text{ m}$$

$$\begin{aligned} \text{sehingga, } E_p &= m \cdot g \cdot h \\ &= 0,5 \text{ kg} \times 10 \text{ m/s}^2 \times 20 \text{ m} \\ &= 100 \text{ J} \end{aligned}$$

b. Energi potensial pada ketinggian $h_2 = 5 \text{ m}$

$$E_{p_2} = m \cdot g \cdot h_2 = 0,5 \text{ kg} \times 10 \text{ m/s}^2 \times 5 \text{ m} = 25 \text{ J}$$

$$\begin{aligned} \text{sehingga, } \Delta E_p &= E_{p_2} - E_{p_1} \\ &= (25 - 100) \text{ J} \\ &= -75 \text{ J} \end{aligned}$$

2. Sebuah benda bermassa 4 kg mula-mula diam, kemudian bergerak lurus dengan percepatan 3 m/s². Berapakah usaha yang diubah menjadi energi kinetik setelah 2 sekon?

Penyelesaian:

Diketahui: $m = 4 \text{ kg}$

$$a = 3 \text{ m/s}^2$$

$$v_0 = 0$$

$$t = 2 \text{ s}$$

Ditanya: $W = \dots ?$

Jawab:

$$v = v_0 + a \cdot t = 0 + (3)(2) = 6 \text{ m/s}$$

$$W = \Delta Ek$$

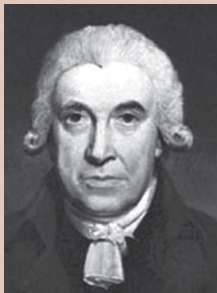
$$= Ek - Ek_0 = \frac{1}{2} m \cdot v^2 - \frac{1}{2} m \cdot v_0^2$$

$$= \frac{1}{2} \times (4 \text{ kg}) \times (6 \text{ m/s})^2 - 0$$

$$= 72 \text{ J}$$

Uji Kemampuan 4.2

1. Buah dengan massa 300 gram jatuh dari pohonnya dengan ketinggian 6 m. Jika $g = 10 \text{ m/s}^2$, berapakah perubahan energi potensial buah tersebut pada ketinggian 2 m?
2. Sebuah anak panah ditembakkan miring ke atas dengan sudut 60° dan energi kinetik 300 J. Jika $g = 10 \text{ m/s}^2$, berapakah besarnya energi kinetik saat mencapai titik tertinggi?



James Watt (1736 - 1819), Sebagai penghormatan atas jasa-jasanya, nama Watt digunakan sebagai satuan daya, dengan lambang W.



C. Daya

Daya didefinisikan sebagai kecepatan melakukan usaha atau kemampuan untuk melakukan usaha tiap satuan waktu. Usaha belum dapat memberikan penjelasan lengkap tentang perpindahan benda akibat pengaruh gaya. Untuk membedakan waktu yang diperlukan benda dalam melakukan usaha digunakan rumus daya. Secara matematis dituliskan:

$$P = \frac{W}{t} \dots\dots\dots (4.7)$$

dengan:

P = daya (J/s)

W = usaha (J)

t = waktu (s)

Berdasarkan persamaan (4.1), $W = F \cdot s$, sehingga persamaan (4.7) menjadi:

$$P = \frac{F \cdot s}{t} = F \left(\frac{s}{t} \right)$$

karena $\frac{s}{t} = v$, maka:

$$P = Fv \dots\dots\dots (4.8)$$

dengan:

P = daya (J/s)

F = gaya (N)

v = kecepatan (m/s)

Dalam SI, satuan daya adalah joule/sekon atau watt dimana 1 watt = 1 J/s.

Untuk keperluan praktis, terutama dalam bidang teknik, satuan daya yang digunakan adalah daya kuda atau horse power (hp) atau paarde kracht (pk) dimana:

1 hp = 746 watt.

Contoh Soal

Seseorang yang massanya 60 kg berlari menaiki tangga yang tingginya 4 m dalam waktu 4 sekon. Berapakah daya yang dihasilkan orang tersebut? ($g = 10 \text{ m/s}^2$).

Penyelesaian:

Diketahui: $m = 60 \text{ kg}$; $h = 4 \text{ m}$; $t = 4 \text{ s}$; $g = 10 \text{ m/s}^2$

Ditanya: $P = \dots ?$

Jawab:

$$P = \frac{F \cdot s}{t} = \frac{m \cdot g \cdot h}{t} = \frac{60 \times 10 \times 4}{4} = 600 \text{ watt}$$

Uji Kemampuan 4.3

Sebuah mobil dengan massa 1.100 kg memiliki mesin berdaya 6 pk dengan kecepatan awal $v_1 = 36$ km/jam dan kecepatan akhir $v_2 = 72$ km/jam. Jika 1 pk = 750 W dan gaya gesek diabaikan, hitunglah waktu yang diperlukan mobil tersebut untuk mencapai kecepatan v_2 !



D. Hukum Kekekalan Energi Mekanik

Energi mekanik adalah energi yang dihasilkan oleh benda karena sifat geraknya. Energi mekanik merupakan jumlah energi potensial dan energi kinetik yang dimiliki oleh benda. Secara matematis dituliskan:

$$Em = Ep + Ek \dots\dots\dots (4.9)$$

Misalnya, sebuah benda jatuh bebas dari ketinggian h di bawah pengaruh gravitasi (Gambar 4.9).

Pada ketinggian tersebut, benda memiliki energi potensial $Ep = m \cdot g \cdot h$ dan energi kinetik $Ek = 0$. Energi mekanik di titik A adalah:

$$Em_A = Ep_A + Ek_A$$

$$Em_A = m \cdot g \cdot h + 0 = m \cdot g \cdot h \dots\dots\dots (4.9a)$$

Pada saat benda bergerak jatuh, tingginya berkurang dan kecepatannya bertambah. Dengan demikian, energi potensialnya berkurang, tetapi energi kinetiknya bertambah. Tepat sebelum benda menyentuh tanah (di titik B), semua energi potensial akan diubah menjadi energi kinetik. Dapat dikatakan energi potensial di titik B, $Ep_B = 0$ dan energi kinetiknya $Ek_B = \frac{1}{2} m \cdot v_B^2$, sehingga energi mekanik pada titik tersebut adalah:

$$Em_B = Ep_B + Ek_B$$

$$Em_B = 0 + \frac{1}{2} m \cdot v_B^2 = \frac{1}{2} m \cdot v_B^2$$

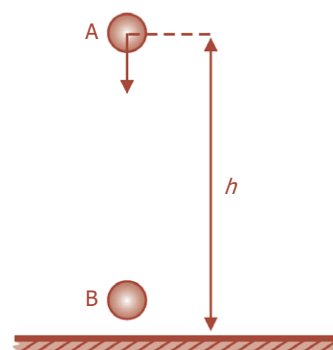
Berdasarkan persamaan pada gerak jatuh bebas, besarnya kecepatan di titik B adalah $v_B = \sqrt{2gh_A}$, sehingga:

$$Em_B = \frac{1}{2} m v_B^2$$

$$= \frac{1}{2} m (\sqrt{2gh_A})^2 = \frac{1}{2} m (2gh_A)$$

$$Em_B = m \cdot g \cdot h_A \dots\dots\dots (4.9b)$$

Berdasarkan persamaan (4.9a) dan (4.9b) ternyata energi mekanik di A dan B besarnya sama, $Em_A = Em_B$.



Gambar 4.9 Hukum Kekekalan Energi Mekanik pada gerak jatuh bebas.

Komet

Kolom mengingat

Energi mekanik merupakan gabungan energi potensial dan energi kinetiknya.

$$Em = Ep + Ek$$

$$= m \cdot g \cdot h + \frac{1}{2} m v^2$$

Dengan demikian, dapat dikatakan jika hanya gaya gravitasi yang bekerja pada benda, maka energi mekanik besarnya selalu tetap. Pernyataan ini dikenal dengan Hukum Kekekalan Energi Mekanik, yang dirumuskan:

$$\begin{aligned} Em_A &= Em_B \\ Ep_A + Ek_A &= Ep_B + Ek_B \\ m \cdot g \cdot h_A + \frac{1}{2} m v_A^2 &= m \cdot g \cdot h_B + \frac{1}{2} m v_B^2 \dots\dots\dots (4.10) \end{aligned}$$

Persamaan (4.10) berlaku jika benda dalam medan gaya gravitasi dan tidak ada gaya lain yang bekerja. Misalnya, pegas yang mengalami getaran harmonis dalam ruang hampa (tidak ada gesekan dengan udara) akan terus bergetar tanpa henti karena energi mekaniknya tidak hilang.

Contoh Soal

Sebuah benda ditembakkan miring ke atas dengan sudut elevasi 30° dan dengan energi kinetik 400 J. Jika $g = 10 \text{ m/s}^2$, berapakah energi kinetik dan energi potensial benda saat mencapai titik tertinggi?

Penyelesaian:

Diketahui: $\alpha = 30^\circ$

$$Ek_A = 400 \text{ J}$$

$$g = 10 \text{ m/s}^2$$

Ditanya: $Ek_B = \dots ?$

$$Ep_B = \dots ?$$

Jawab:

$$Ek_A = \frac{1}{2} m v_0^2 = 400 \text{ J}$$

Di titik tertinggi B, kecepatan benda:

$$v_B = v_x = v_0 \cdot \cos \alpha = v_0 \cdot \cos 30^\circ = v_0 \left(\frac{1}{2} \sqrt{3} \right)$$

$$Ek_B = \frac{1}{2} m \cdot v_B^2 = \frac{1}{2} m \left(v_0 \frac{1}{2} \sqrt{3} \right)^2$$

$$= \frac{1}{2} m \cdot v_0^2 \cdot \frac{3}{4}$$

Karena $\frac{1}{2} m v_0^2 = 400 \text{ J}$, maka:

$$Ek_B = 400 \cdot \frac{3}{4} = 300 \text{ J}$$

Di titik A, $Ep_A = 0$

$$Em_A = Em_B$$

$$Ep_A + Ek_A = Ep_B + Ek_B$$

$$0 + 400 = Ep_B + 300$$

$$Ep_B = 100 \text{ J}$$

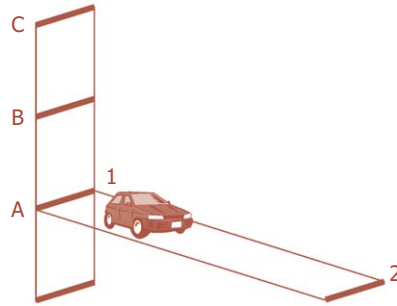
Kegiatan

Tujuan : Menentukan energi kinetik benda yang meluncur.

Alat dan bahan : Mobil mainan, papan luncur, meteran, stopwatch, balok, kayu penyangga.

Cara Kerja:

1. Susunlah peralatan seperti pada gambar berikut ini.



2. Pada papan luncur, tandai garis start dan garis finis. Kemudian ukurlah jarak kedua garis tersebut.
3. Tempatkan papan luncur pada balok penyangga pada posisi A.
4. Lepaskan mobil mainan dari garis start, kemudian catatlah waktu yang diperlukan untuk mencapai garis finis.
5. Ulangilah sebanyak tiga kali, kemudian hitunglah waktu rata-ratanya.
6. Ulangilah langkah 3 - 5 untuk papan luncur pada balok penyangga pada posisi B dan C.
7. Hitunglah besarnya energi mekanik ($E_m = E_p + E_k$), tanpa menghiraukan kemiringan papan luncur, dan catatlah dengan mengikuti format tabel berikut ini.

Panjang lintasan $s = \dots$ m, $m = \dots$ kg.

Posisi Papan Luncur	Ketinggian h (m)	Waktu yang diperlukan t (s)				Kelajuan v (m/s)	Energi Kinetik E_k (J)	Energi Potensial E_p (J)	Energi Mekanik E_m (J)
		t_1	t_2	t_3	t				
A1									
A2									
B1									
B2									
C1									
C2									

Diskusi:

1. Di manakah posisi mobil mainan sehingga $E_k = 0$? Mengapa demikian?
2. Di manakah posisi mobil mainan sehingga $E_p = 0$? Mengapa demikian?
3. Tulislah bunyi Hukum Kekekalan Energi Mekanik!

Uji Kemampuan 4.4

Bus dengan massa 3,5 ton bergerak menuruni bukit dengan kecepatan awal 72 km/jam dan kecepatan akhir 18 km/jam. Jika ketinggian bukit 32 m, berapakah energi kinetik dan energi potensial saat $h = 32$ m? (gaya gesek diabaikan)

Percikan Fisika



Kereta Berenergi

Mesin bakar dokhil cukup rapi dan kuat untuk membawa sumber energinya, biasanya bensin. Ini adalah sebuah model kereta motor yang dibuat pada tahun 1875 oleh Siegfried Marais, seorang insinyur Austria. Mobil ini berkecepatan maksimal lebih kurang 6 km/jam (4 mil/jam). Sebelumnya, kuda senantiasa menjadi sumber energi yang penting bagi angkutan. Pada tahun 1783 James Watt memberikan definisi kekuatan satu kuda sebagai suatu satuan tenaga, yang disebut tenaga kuda.

Fiesta

Fisikawan Kita



James Prescott Joule

Ia seorang ahli fisika berkebangsaan Inggris. Lahir di Lancashire pada tanggal 24 Desember 1818 dan meninggal dunia di Chesire pada tanggal 11 Oktober 1889. Ia adalah penemu Hukum Joule, dan namanya diabadikan menjadi satuan energi. Joule pula yang dapat menunjukkan bahwa kalor merupakan salah satu bentuk energi, dengan konversi 1 joule = 0,24 kalori atau 1 kalori = 4,18 joule. Ia adalah murid John Dalton di Universitas Manchester. Bersama William Thomson (Lord Kelvin), ia menemukan efek Joule-Thomson.

Kilas Balik

- * Usaha merupakan proses perubahan energi. Usaha didefinisikan sebagai hasil kali komponen gaya yang segaris dengan perpindahan dengan besarnya perpindahan:
 $W = F_s$

- * Apabila gaya membentuk sudut tertentu terhadap arah horizontal, maka besarnya usaha: $W = Fs \cos \alpha$.
- * Usaha yang dilakukan oleh beberapa gaya yang bertitik tangkap sama merupakan jumlah aljabar dari usaha yang dilakukan masing-masing gaya.

$$W = W_1 + W_2 + W_3 + \dots + W_n$$
- * Energi adalah kemampuan untuk melakukan usaha.
- * Energi potensial gravitasi adalah energi yang dimiliki oleh benda karena kedudukannya atau ketinggiannya.

$$Ep = m \cdot g \cdot h$$
- * Usaha yang dilakukan oleh gaya berat merupakan perubahan energi potensial benda.

$$W = -\Delta Ep = -m \cdot g(h_2 - h_1)$$
- * Energi kinetik adalah energi yang dimiliki benda karena geraknya.

$$Ek = \frac{1}{2} m \cdot v^2$$
- * Untuk gaya yang besarnya tetap, usaha yang dilakukan oleh gaya sama dengan perubahan energi kinetiknya.

$$W = Ek_2 - Ek_1 = \frac{1}{2} m \cdot v_2^2 - \frac{1}{2} m \cdot v_1^2$$
- * Energi mekanik adalah jumlah energi potensial dan energi kinetik yang dimiliki oleh benda.

$$Em = Ep + Ek$$
- * Hukum Kekekalan Energi Mekanik menyatakan bahwa dalam medan gravitasi, energi mekanik yang dimiliki oleh benda besarnya tetap.

$$Em = \text{konstan}$$

$$Em_A = Em_B$$

$$Ep_A + Ek_A = Ep_B + Ek_B$$

$$m \cdot g \cdot h_A + \frac{1}{2} m v_A^2 = m \cdot g \cdot h_B + \frac{1}{2} m v_B^2$$

Uji Kompetensi

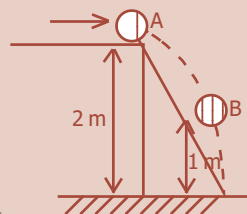
A. Pilihlah jawaban yang paling tepat!

1. Jika dimensi panjang, massa, dan waktu berturut-turut adalah L, M, T, maka dimensi energi adalah

a. MLT^{-2}	d. $ML^{-2}T^{-2}$
b. MLT^{-1}	e. ML^2T^{-2}
c. $ML^{-1}T^{-2}$	

2. Benda bermassa 10 kg berada di atas bidang datar licin dipengaruhi gaya 100 N yang membentuk sudut 60° terhadap horizontal. Usaha yang dilakukan gaya saat benda berpindah 5 m adalah
 - a. 100 J
 - b. 150 J
 - c. 200 J
 - d. 250 J
 - e. 500 J
3. Usaha yang dilakukan oleh suatu gaya terhadap benda sama dengan nol apabila arah gaya dengan perpindahan benda membentuk sudut sebesar
 - a. 0°
 - b. 45°
 - c. 60°
 - d. 90°
 - e. 180°
4. Sebuah balok dengan massa 1.800 gram ($g = 10 \text{ m/s}^2$) ditarik secara horizontal selama 4 sekon. Jika balok berpindah 2 m, daya yang dihasilkan adalah
 - a. 3.600 W
 - b. 900 W
 - c. 225 W
 - d. 36 W
 - e. 9 W
5. Massa benda A tiga kali massa benda B dan kecepatan benda A setengah kali kecepatan benda B. Perbandingan energi kinetik benda A dengan energi kinetik benda B adalah
 - a. 3 : 4
 - b. 3 : 2
 - c. 2 : 3
 - d. 2 : 1
 - e. 1 : 1
6. Benda dengan massa 3 kg dilempar vertikal ke atas dengan kecepatan awal 20 m/s. Jika $g = 10 \text{ m/s}^2$, maka energi potensial benda saat mencapai titik tertinggi adalah
 - a. 300 J
 - b. 400 J
 - c. 500 J
 - d. 600 J
 - e. 700 J
7. Dua buah benda A dan B masing-masing bermassa m , jatuh bebas dari ketinggian h meter dan $4h$ meter. Jika A menyentuh tanah dengan kecepatan $v \text{ m/s}$, maka benda B akan menyentuh tanah dengan energi kinetik sebesar
 - a. $4m.v^2$
 - b. $2m.v^2$
 - c. $\frac{3}{4}m.v^2$
 - d. $\frac{1}{2}m.v^2$
 - e. $\frac{1}{4}m.v^2$

8.



- a. 2 J
- b. 10 J
- c. 12 J

Benda dengan massa 1 kg didorong dari permukaan meja hingga kecepatan pada saat lepas dari meja 2 m/s seperti pada gambar. Energi mekanik benda pada saat ketinggian 1 meter dari tanah adalah ($g = 10 \text{ m/s}^2$)

- d. 22 J
- e. 24 J

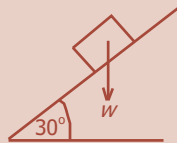
9. Sebuah batu dengan massa 1 kg dilemparkan vertikal ke atas dengan kecepatan 40 m/s. Energi kinetik batu pada saat mencapai ketinggian 20 m adalah
 - a. 100 J
 - b. 200 J
 - c. 400 J
 - d. 600 J
 - e. 800 J
10. Benda yang bermassa 700 gram dilempar ke atas hingga mencapai ketinggian 9 m. Perubahan energi potensial benda ketika berada pada ketinggian 5 m ($g = 10 \text{ m/s}^2$) adalah
 - a. 28 J
 - b. 35 J
 - c. 42 J
 - d. 54 J
 - e. 63 J

B. Jawablah dengan singkat dan benar!

1. Mobil yang massanya 2.000 kg bergerak dengan kecepatan 72 km/jam. Beberapa saat kemudian mobil berhenti. Setelah menempuh jarak 50 meter, kecepatan mobil menjadi 36 km/jam. Berapakah usaha yang dilakukan oleh gaya pengereman mobil tersebut?

2. Sebuah batu bermassa 2 kg dilepaskan dari ketinggian 4 m. Jika percepatan gravitasi 10 m/s^2 , tentukan energi kinetik batu sesaat sebelum menumbuk tanah!

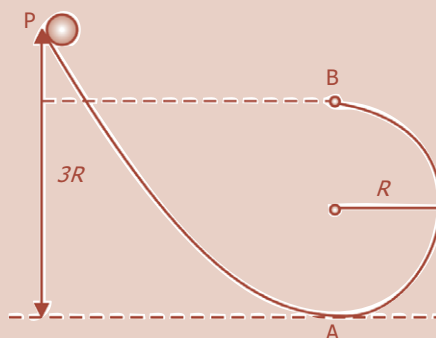
3.



Pada gambar di samping, benda yang beratnya 20 N meluncur sejauh 2 m. Apabila gesekan antara benda dan bidang miring diabaikan, tentukan usaha yang dilakukan oleh gaya berat!

4. Sebuah benda dengan massa 4 kg ditembakkan vertikal ke atas dengan kecepatan 40 m/s. Hitunglah besarnya energi kinetik dan energi potensial saat benda berada pada ketinggian 40 m ($g = 10 \text{ m/s}^2$)!

5.

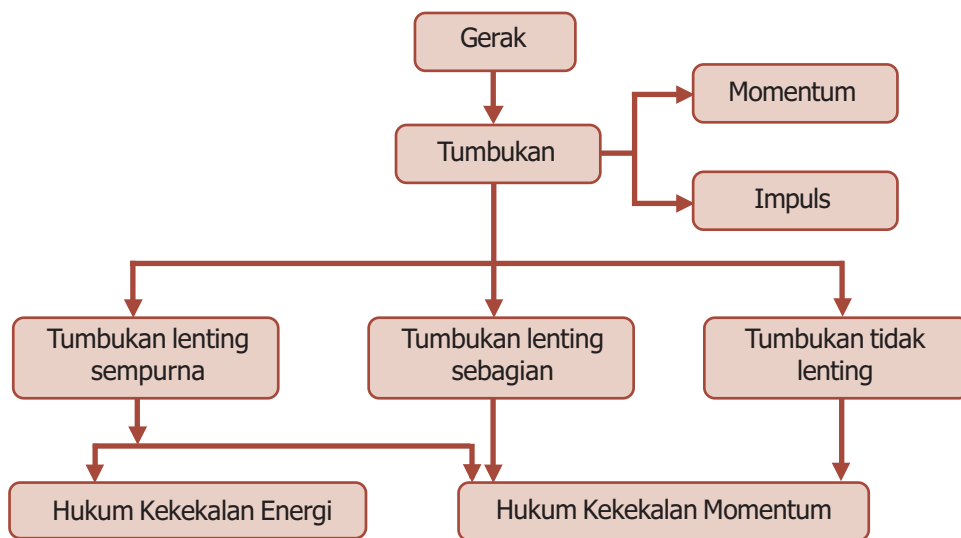


Sebuah bola bermassa 1.600 gram bergerak menuruni permukaan talang licin, yang berbentuk seperti gambar. Jika jari-jari $R = 35 \text{ cm}$, $g = 10 \text{ m/s}^2$, hitunglah:

- a. energi kinetik saat di titik A, dan
- b. kecepatan bola meninggalkan titik B!

PETA KONSEP

Bab 5 Momentum dan Impuls



BAB

5

MOMENTUM DAN IMPULS



- Mobil mengalami kerusakan parah karena melaju dengan kecepatan tinggi.

Sumber: *Tempo*, Oktober 2006

Pada gambar tampak kondisi mobil setelah bertabrakan. Kerusakan yang parah dialami oleh mobil tersebut. Hal ini terjadi karena mobil tersebut melaju dengan kecepatan tinggi. Semakin besar massa dan kecepatan yang dimiliki benda bergerak maka semakin sulit untuk dihentikan dan makin besar akibatnya. Hal seperti ini dipelajari dalam momentum dan impuls. Untuk lebih jelasnya ikutilah pembahasan berikut ini.

Kata Kunci

gaya, Hukum Kekekalan Energi, Hukum Kekekalan Momentum, impuls, koefisien restitusi, momentum, tumbukan



A. Pengertian Momentum dan Impuls



Sumber: Jawa Pos, 17 November 2006

Gambar 5.1 Bola yang ditendang dengan keras akan sulit untuk dihentikan.

Pada bab-bab sebelumnya, kalian telah mempelajari beberapa besaran yang berkaitan dengan gerak benda, di antaranya kecepatan, percepatan, gaya, usaha, dan energi. Pada bab ini, kita akan mempelajari konsep momentum dan impuls, yang akan berguna dalam menganalisis gerak benda, baik benda tunggal ataupun sistem yang melibatkan dua benda, misalnya peristiwa tumbukan.

Pada peristiwa tabrakan, dua kendaraan dengan kecepatan tinggi akan mengalami kerusakan lebih parah daripada dua kendaraan dengan kecepatan rendah. Mengapa demikian? Mengapa pula bola yang ditendang dengan keras lebih sulit dihentikan daripada bola yang ditendang pelan?

Momentum dimiliki oleh benda yang bergerak. **Momentum** adalah kecenderungan benda yang bergerak untuk melanjutkan gerakannya pada kelajuan yang konstan. Momentum merupakan besaran vektor yang searah dengan kecepatan benda. Momentum dapat dirumuskan sebagai hasil perkalian massa dengan kecepatan. Secara matematis dituliskan:

$$p = m \cdot v \dots\dots\dots (5.1)$$

dengan:

p = momentum (kgm/s)

m = massa benda (kg)

v = kecepatan benda (m/s)

Semakin besar massa suatu benda, maka semakin besar momentumnya, dan semakin cepat gerak suatu benda, maka semakin besar pula momentumnya. Misalnya, dengan kecepatan yang sama, jembatan yang tertabrak bus akan mengalami kerusakan lebih parah daripada jembatan yang tertabrak mobil. Mobil dengan kecepatan tinggi akan lebih sulit dihentikan daripada mobil dengan kecepatan rendah. Dan apabila terjadi tumbukan, mobil dengan kecepatan tinggi akan mengalami kerusakan lebih parah. Semakin besar momentum sebuah benda yang sedang melaju, semakin sulit untuk menghentikannya dan semakin besar tumbukannya jika mengenai benda lain.

Untuk membuat suatu benda yang diam menjadi bergerak diperlukan sebuah gaya yang bekerja pada benda tersebut selama interval waktu tertentu. Gaya yang diperlukan untuk membuat sebuah benda tersebut bergerak dalam interval waktu tertentu disebut **impuls**.

Impuls digunakan untuk menambah, mengurangi, dan mengubah arah momentum dalam satuan waktu. Impuls dapat dirumuskan sebagai hasil perkalian gaya dengan interval waktu. Secara matematis dituliskan:

$$I = F \cdot \Delta t \dots\dots\dots (5.2)$$

dengan:

F = gaya (N)

Δt = waktu (s)

I = impuls (N.s)

Impuls pada umumnya digunakan dalam peristiwa apabila gaya yang bekerja besar dan dalam waktu yang sangat singkat. Berdasarkan Hukum II Newton:

$$F = m \cdot a$$

karena $a = \frac{\Delta v}{\Delta t} = \frac{v_2 - v_1}{\Delta t}$, maka:

$$F = m \frac{\Delta v}{\Delta t}$$

$$F \cdot \Delta t = m \cdot \Delta v = mv_2 - mv_1 \dots\dots\dots (5.3)$$

$$I = \Delta p = p_2 - p_1$$

Dari persamaan (5.3) dapat dikatakan bahwa impuls yang dikerjakan pada suatu benda sama dengan perubahan momentumnya. Penjumlahan momentum mengikuti aturan penjumlahan vektor, dirumuskan:

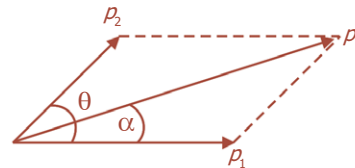
$$p = p_1 + p_2 \dots\dots\dots (5.4)$$

Jika dua vektor momentum p_1 dan p_2 membentuk sudut, seperti Gambar 5.3, maka:

$$p = \sqrt{p_1^2 + p_2^2 + 2p_1p_2 \cos \theta}$$



Gambar 5.2 Gaya F bekerja pada benda bermassa m dengan percepatan a .



Gambar 5.3 Penjumlahan dua vektor yang memiliki sudut θ .

Contoh Soal

Bola A dengan massa 200 gram digelindingkan ke kanan dengan kelajuan 10 m/s dan bola B dengan massa 400 gram digelindingkan ke kiri dengan kelajuan 5 m/s. Jika kedua bola tersebut bertumbukan, hitunglah momentumnya!

Penyelesaian:

Diketahui: $m_A = 200 \text{ g} = 0,2 \text{ kg}$ $m_B = 400 \text{ g} = 0,4 \text{ kg}$

$v_A = 10 \text{ m/s}$ $v_B = 5 \text{ m/s}$

Ditanya: $p_{\text{total}} = \dots ?$

Jawab:

$$\begin{aligned} p_{\text{total}} &= m_A v_A + m_B v_B \\ &= (0,2 \times 10) + (0,4 \times 5) \end{aligned}$$

$$p_{\text{total}} = 4 \text{ kg.m/s}$$

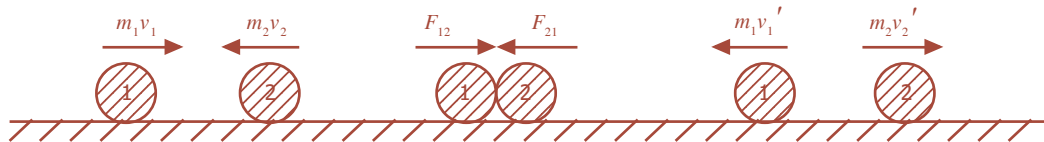
Uji Kemampuan 5.1

1. Dua buah bola dilemparkan ke arah tembok secara bergantian. Bola A dengan massa 350 gram dilemparkan dengan kecepatan 5 m/s. Bola B dengan massa 500 gram dilemparkan dengan kecepatan 2 m/s. Di antara kedua bola tersebut, manakah yang menghasilkan tumbukan yang lebih keras? Mengapa demikian?
2. Bola voli yang bermassa 800 gram dipukul dengan gaya 45 N. Jika selang waktu kontak antara tangan dengan bola 1 sekon, berapakah impuls bola voli?



B. Hukum Kekekalan Momentum

Gambar 5.4 menunjukkan dua buah bola biliar dengan massa masing-masing m_1 dan m_2 , bergerak pada satu garis lurus dan searah dengan kecepatan v_1 dan v_2 .



Gambar 5.4 Hukum Kekekalan Momentum pada tumbukan antara dua bola.

Pada saat bertumbukan, bola 1 menekan bola 2 dengan gaya F_{12} ke kanan selama Δt , sedangkan bola 2 menekan bola 1 dengan gaya yang arahnya berlawanan. Setelah bertumbukan, kecepatannya masing-masing v_1' dan v_2' . Pada saat kedua bola bertumbukan, berdasarkan Hukum II Newton dapat dituliskan:



Semakin besar gaya yang bekerja pada suatu benda dan semakin lama waktu yang digunakan, maka semakin besar momentum yang dimiliki benda tersebut.

$$\begin{aligned}
 F_{\text{aksi}} + F_{\text{reaksi}} &= 0 \\
 F_{\text{aksi}} &= -F_{\text{reaksi}} \\
 F_{12} &= -F_{21} \\
 F_{12} \cdot \Delta t &= -F_{21} \cdot \Delta t \\
 m_1 v_1' - m_1 v_1 &= -(m_2 v_2' - m_2 v_2) \\
 m_1 v_1 + m_2 v_2 &= m_1 v_1' + m_2 v_2' \dots\dots\dots (5.5)
 \end{aligned}$$

dengan:

- m_1 = massa benda 1 (kg)
- v_1 = kecepatan benda 1 sebelum tumbukan (m/s)
- v_1' = kecepatan benda 1 setelah tumbukan (m/s)
- m_2 = massa benda 2 (kg)
- v_2 = kecepatan benda 2 sebelum tumbukan (m/s)
- v_2' = kecepatan benda 2 setelah tumbukan (m/s)

Pada contoh tersebut, jika resultan gaya yang bekerja pada benda sama dengan nol, maka momentum total sebelum tumbukan sama dengan momentum total setelah tumbukan.

Persamaan (5.5) merupakan Hukum Kekekalan Momentum, yang dapat dinyatakan berikut ini.

Jika tidak ada gaya luar yang bekerja pada benda, maka jumlah momentum sebelum tumbukan sama dengan jumlah momentum setelah tumbukan.

Contoh Soal

1. Sebuah bola golf bermassa 0,25 kg dipukul dengan stik hingga melesat dengan kelajuan 60 m/s. Jika selang waktu kontak antara stik dan bola 0,05 sekon, berapakah gaya rata-rata yang dikerjakan stik?

Penyelesaian:

$$\text{Diketahui: } m = 0,25 \text{ kg} \quad v_2 = 60 \text{ m/s}$$

$$v_1 = 0 \quad \Delta t = 0,05 \text{ s}$$

$$\text{Ditanya: } F = \dots ?$$

Jawab:

$$F \cdot \Delta t = m(v_2 - v_1)$$

$$F (0,05) = 0,25 \times (60 - 0)$$

$$F = \frac{15}{0,05} = 300 \text{ N}$$

2. Sebuah peluru bermassa 15 gram ditembakkan dari senapan bermassa 1,6 kg dengan kelajuan 120 m/s. Hitunglah kecepatan mundur sesaat menembak!

Penyelesaian:

$$\text{Diketahui: } m_p = 15 \text{ g} = 0,015 \text{ kg} \quad v_p' = 120 \text{ m/s}$$

$$v_p = 0 \quad m_s = 1,6 \text{ kg}$$

$$\text{Ditanya: } v_s' = \dots ?$$

Jawab:

$$m_p v_p + m_s v_s = m_p v_p' + m_s v_s'$$

$$0 + 0 = (0,015 \times 120) + (1,6 \times v_s')$$

$$-1,6 v_s' = 1,8$$

$$v_s' = -1,125 \text{ m/s}$$

Uji Kemampuan 5.2

Seorang nelayan yang bermassa 70 kg mencari ikan dengan naik perahu yang bermassa 480 kg dengan kelajuan 5,5 m/s. Karena suatu hal, nelayan melompat dari perahu dengan kecepatan 7 m/s searah gerak perahu. Berapakah kecepatan perahu sesaat setelah nelayan melompat!

Percikan Fisika

Konservasi Momentum



Ketika sebuah senapan menembakkan sebutir peluru, gaya yang bekerja pada peluru sebanding dengan hentakan kokang senapan, namun dengan arah yang berlawanan. Sesuai dengan Hukum II Newton, laju perubahan momentum peluru dan senapan haruslah setara dan berlawanan arah. Perubahan momentum pada senapan dan peluru harus sama besar dan berlawanan arah karena gaya tembak dan gaya kokang bekerja selama jangka waktu yang sama. Jumlah momentum peluru dan senapan adalah nol sebelum dan sesudah penembakan.



C. Tumbukan



Sumber: *Jawa Pos*, 24 Agustus 2006

Gambar 5.5 Bus menabrak pohon merupakan contoh tumbukan.

Dalam kehidupan ini, banyak kita jumpai peristiwa tumbukan. Tabrakan mobil di jalan raya, bus menabrak pohon, tumbukan dua bola biliar, tumbukan antara bola dengan tanah atau dinding merupakan contoh peristiwa tumbukan. Tumbukan dapat terjadi pada saat benda yang bergerak mengenai benda lain yang sedang bergerak atau diam. Pada bab ini, kita hanya akan membahas mengenai tumbukan sentral lurus, yaitu tumbukan antara dua benda yang arah kecepatannya berimpit dengan garis hubung kedua pusat massa benda.

Berdasarkan sifat kelentingan benda, tumbukan dibedakan menjadi tiga jenis, yaitu tumbukan lenting sempurna, tumbukan lenting sebagian, dan tumbukan tidak lenting sama sekali. Dengan menggunakan Hukum Kekekalan Momentum dan Hukum Kekekalan Energi, kita dapat menentukan peristiwa yang terjadi setelah tumbukan.

1. Tumbukan Lenting Sempurna

Apabila tidak ada energi yang hilang selama tumbukan dan jumlah energi kinetik kedua benda sebelum dan sesudah tumbukan sama, maka tumbukan itu disebut **tumbukan lenting sempurna**. Pada tumbukan lenting sempurna berlaku Hukum Kekekalan Momentum dan Hukum Kekekalan Energi Kinetik. Misalnya, dua buah benda massanya masing-masing m_1 dan m_2 bergerak dengan kecepatan v_1 dan v_2 dengan arah berlawanan seperti pada Gambar 5.6.

Kedua benda bertumbukan lenting sempurna, sehingga setelah tumbukan kecepatan kedua benda menjadi v_1' dan v_2' . Berdasarkan Hukum Kekekalan Momentum, dituliskan:

$$\begin{aligned} m_1 v_1 + m_2 v_2 &= m_1 v_1' + m_2 v_2' \\ m_1 v_1 - m_1 v_1' &= m_2 v_2' - m_2 v_2 \\ m_1 (v_1 - v_1') &= m_2 (v_2' - v_2) \dots\dots\dots (i) \end{aligned}$$

Dari Hukum Kekekalan Energi Kinetik diperoleh:

$$\begin{aligned} \frac{1}{2} m_1 v_1^2 + \frac{1}{2} m_2 v_2^2 &= \frac{1}{2} m_1 (v_1')^2 + \frac{1}{2} m_2 (v_2')^2 \\ m_1 v_1^2 + m_2 v_2^2 &= m_1 (v_1')^2 + m_2 (v_2')^2 \\ m_1 (v_1^2 - (v_1')^2) &= m_2 ((v_2')^2 - v_2^2) \\ m_1 (v_1 + v_1')(v_1 - v_1') &= m_2 (v_2' + v_2)(v_2' - v_2) \dots\dots\dots (ii) \end{aligned}$$

Jika persamaan (ii) dibagi dengan persamaan (i) diperoleh:

$$\begin{aligned} v_1 + v_1' &= v_2' + v_2 \\ v_1' - v_2' &= v_2 - v_1 \\ v_1' - v_2' &= -(v_1 - v_2) \dots\dots\dots (5.6) \end{aligned}$$

Persamaan (5.6) dapat dituliskan:

$$-\frac{(v_1' - v_2')}{v_1 - v_2} = 1 \dots\dots\dots (5.7)$$

Bilangan $-\frac{(v_1' - v_2')}{v_1 - v_2} = 1$ disebut koefisien restitusi (e), yang merupakan negatif perbandingan kecepatan relatif kedua benda sebelum tumbukan. Persamaan (5.7) dapat dinyatakan:

$$e = -\frac{(v_1' - v_2')}{v_1 - v_2} = 1 \dots\dots\dots (5.8)$$

Dengan demikian, pada tumbukan lenting sempurna koefisien restitusi (e) = 1.

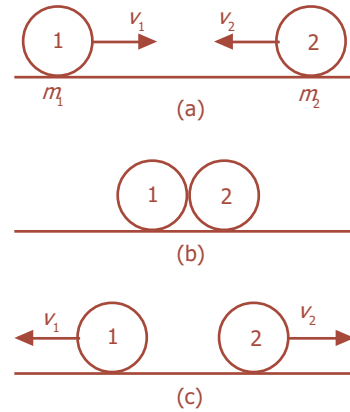
2. Tumbukan Lenting Sebagian

Pada tumbukan lenting sebagian, beberapa energi kinetik akan diubah menjadi energi bentuk lain seperti panas, bunyi, dan sebagainya. Akibatnya, energi kinetik sebelum tumbukan lebih besar daripada energi kinetik sesudah tumbukan. Sebagian besar tumbukan yang terjadi antara dua benda merupakan tumbukan lenting sebagian. Pada tumbukan lenting sebagian berlaku Hukum Kekekalan Momentum, tetapi tidak berlaku Hukum Kekekalan Energi Kinetik.

$\sum Ek > \sum Ek'$, maka:

$$Ek_1 + Ek_2 > Ek_1' + Ek_2'$$

$$v_2 - v_1 > v_1' - v_2'$$

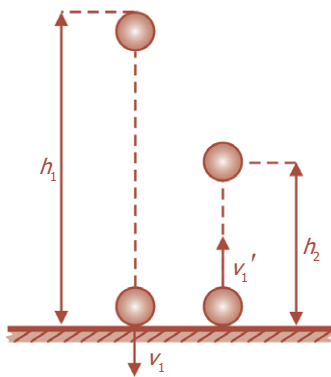


Gambar 5.6 Tumbukan lenting sempurna antara dua benda: (a) sebelum tumbukan, (b) saat tumbukan, (c) setelah tumbukan.

Komet

Kolom mengingat

Pada tumbukan lenting sempurna, koefisien restitusi (e) = 1; pada tumbukan lenting sebagian $0 < e < 1$; dan pada tumbukan tidak lenting sama sekali $e = 0$.



Gambar 5.7 Tumbukan lenting sebagian antara bola dengan lantai.

Sehingga persamaan (5.7) dapat dituliskan:

$$-\frac{(v_1' - v_2')}{v_1 - v_2} < 1 \dots\dots\dots (5.9)$$

Dengan demikian, dapat disimpulkan pada tumbukan lenting sebagian, koefisien restitusi (e) adalah:

$$0 < e < 1.$$

Untuk menentukan koefisien restitusi benda yang bertumbukan, perhatikan contoh berikut ini.

Perhatikan Gambar 5.7. Sebuah bola elastis jatuh bebas dari ketinggian h_1 dari lantai, maka akan terjadi tumbukan antara bola dengan lantai sehingga bola memantul setinggi h_2 .

Berdasarkan persamaan pada gerak jatuh bebas, kecepatan benda sesaat sebelum tumbukan adalah:

$$v_1 = +\sqrt{2gh_1}$$

Gerak bola sesaat setelah terjadi tumbukan dapat diidentifikasi dengan gerak jatuh bebas, sehingga:

$$v_1' = -\sqrt{2gh_2} \text{ (arah ke atas negatif)}$$

Karena lantai diam, maka kecepatan lantai sebelum dan sesudah tumbukan adalah nol, $v_2 = v_2' = 0$, sehingga besarnya koefisien restitusi adalah:

$$\begin{aligned} e &= -\frac{(v_1' - v_2')}{v_1 - v_2} = -\frac{(v_1' - 0)}{(v_1 - 0)} \\ e &= -\frac{v_1'}{v_1} = -\frac{(-\sqrt{2gh_2})}{+\sqrt{2gh_1}} \\ e &= \sqrt{\frac{h_2}{h_1}} \dots\dots\dots (5.10) \end{aligned}$$

3. Tumbukan tidak Lenting Sama Sekali

Pada tumbukan tidak lenting sama sekali, sesudah tumbukan kedua benda bersatu, sehingga kecepatan kedua benda sesudah tumbukan besarnya sama, yaitu $v_1' = v_2' = v'$. Berdasarkan Hukum Kekekalan Momentum maka:

$$\begin{aligned} m_1v_1 + m_2v_2 &= m_1v_1' + m_2v_2' \\ m_1v_1 + m_2v_2 &= (m_1 + m_2) v' \dots\dots\dots (5.11) \end{aligned}$$

Karena $v_1' = v_2'$, maka $v_1' - v_2' = 0$, sehingga koefisien restitusi (e) adalah:

$$-\frac{(v_1' - v_2')}{v_1 - v_2} = 0$$

Jadi, pada tumbukan tidak lenting sama sekali besarnya koefisien restitusi adalah nol ($e = 0$).

Komet
Kolom mengingat

Pada tumbukan lenting sempurna berlaku Hukum Kekekalan Momentum dan Hukum Kekekalan Energi. Adapun pada tumbukan lenting sebagian dan tumbukan tidak lenting sama sekali berlaku Hukum Kekekalan Momentum dan tidak berlaku Hukum Kekekalan Energi.

Contoh Soal

1. Bola 150 gram bergerak ke kanan dengan kelajuan 20 m/s menumbuk bola lain bermassa 100 gram yang mula-mula diam. Jika tumbukannya lenting sempurna, berapakah kecepatan masing-masing bola setelah tumbukan?

Penyelesaian:

Diketahui: $m_1 = 150 \text{ gram} = 0,15 \text{ kg}$ $v_1 = 20 \text{ m/s}$
 $m_2 = 100 \text{ gram} = 0,1 \text{ kg}$ $v_2 = 0$
 $e = 1$ (lenting sempurna)

Ditanya: $v_1' = \dots ?$
 $v_2' = \dots ?$

Jawab:
$$-\frac{(v_1' - v_2')}{v_1 - v_2} = 1$$

$$-\frac{(v_1' - v_2')}{20 - 0} = 1$$

$$-(v_1' - v_2') = 20$$

$$-v_1' + v_2' = 20 \dots (i)$$

$$m_1 v_1 + m_2 v_2 = m_1 v_1' + m_2 v_2'$$

$$(0,15 \times 20) + (0,1 \times 0) = (0,15 \times v_1') + (0,1 \times v_2')$$

$$3 = 0,15 v_1' + 0,1 v_2' \dots 20$$

$$60 = 3 v_1' + 2 v_2' \dots (ii)$$

Dari persamaan (i) dan (ii), maka:

$$\begin{array}{rcl} 3v_1' + 2v_2' = 60 & || \times 1 & 3v_1' + 2v_2' = 60 \\ -v_1' + v_2' = 20 & || \times 2 & -2v_1' + 2v_2' = 40 \\ \hline 5v_1' & & = 20 \\ v_1' & & = 4 \text{ m/s} \end{array} \quad \begin{array}{rcl} -v_1' + v_2' = 20 \\ -4 + v_2' = 20 \\ v_2' & & = 24 \text{ m/s} \end{array}$$

2. Sebuah benda menumbuk balok yang diam di atas lantai dengan kecepatan 20 m/s. Setelah tumbukan, balok terpental dengan kecepatan 15 m/s searah dengan kecepatan benda semula. Berapakah kecepatan benda setelah tumbukan, jika besar koefisien restitusi $e = 0,4$?

Penyelesaian:

Diketahui: $v_1 = 20 \text{ m/s}$ (benda) $v_2' = 15 \text{ m/s}$
 $v_2 = 0$ (balok) $e = 0,4$

Ditanya: $v_1' = \dots ?$

Jawab:
$$e = -\frac{(v_1' - v_2')}{v_1 - v_2}$$

$$0,4 = -\frac{(v_1' - 15)}{20 - 0}$$

$$0,4 = \frac{-v_1' + 15}{20}$$

$$-v_1' + 15 = 8$$

$$v_1' = 7 \text{ m/s}$$

3. Dua buah benda A dan B massanya masing-masing 5 kg dan 3 kg bergerak berlawanan arah pada bidang datar licin dengan kelajuan sama 2 m/s. Jika terjadi tumbukan tidak lenting sama sekali, berapakah kecepatan kedua benda sesaat setelah tumbukan?

Penyelesaian:

Diketahui: $m_A = 5 \text{ kg}$ $v_A = 2 \text{ m/s}$
 $m_B = 3 \text{ kg}$ $v_B = -2 \text{ m/s}$ (arah berlawanan)

Ditanya: $v_1' = \dots ?$

Jawab: $m_A v_A + m_B v_B = (m_A + m_B) v'$
 $(5 \times 2) + (3 \times (-2)) = (5 + 3) v'$
 $v' = 0,5 \text{ m/s}$

Uji Kemampuan 5.3

1. Dua buah bola A dan B masing-masing dengan massa 500 g dan 1.000 g saling bertumbukan dengan kelajuan awal bola A = 2 m/s dan bola B = 3 m/s. Jika tumbukannya lenting sempurna, berapakah kecepatan masing-masing bola setelah tumbukan?
2. Sebuah bola basket dilepas dari ketinggian h cm. Pada pemantulan pertama mencapai ketinggian 120 cm dan pemantulan kedua mencapai 50 cm. Tentukan nilai h (tinggi bola mula-mula)!
3. Dua buah bola dengan massa sama 400 g dan 600 g saling bertumbukan dengan kelajuan masing-masing 7 m/s dan 4 m/s. Setelah bertumbukan kedua bola bergerak bersama. Hitunglah kecepatan kedua benda setelah tumbukan!



D. Aplikasi Hukum Kekekalan Momentum



Sumber: *Jendela Iptek Gaya dan Gerak*, PT Balai Pustaka, 2000

Gambar 5.8 Aplikasi Hukum Kekekalan Momentum pada gas semburan roket.

Aplikasi Hukum Kekekalan Momentum dapat dilihat pada peristiwa balon yang ditiup dan prinsip kerja roket. Pada saat balon yang ditiup dilepaskan balon akan melesat cepat di udara. Ketika balon melesat, udara dalam balon keluar ke arah berlawanan dengan arah gerak balon. Momentum udara yang keluar dari balon mengimbangi momentum balon yang melesat ke arah berlawanan. Hal yang sama berlaku pada roket. Semburan gas panas menyebabkan roket bergerak ke atas dengan kecepatan sangat tinggi.

Sebuah roket mengandung tangki yang berisi bahan hidrogen cair dan oksigen cair. Pembakaran bahan-bahan tersebut menghasilkan gas panas yang menyembur keluar melalui ekor roket. Pada saat gas keluar dari roket terjadi perubahan momentum gas selama waktu tertentu, sehingga menghasilkan gaya yang dikerjakan roket pada gas.

Berdasarkan Hukum III Newton, timbul reaksi gaya yang dikerjakan gas pada roket yang besarnya sama tetapi arahnya berlawanan. Gaya inilah yang menyebabkan roket terdorong ke atas (Gambar 5.9).

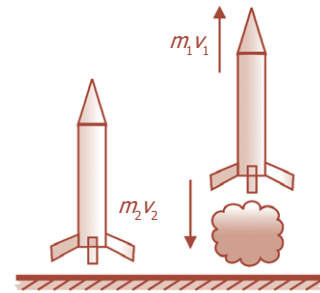
Prinsip terdorongnya roket memenuhi Hukum Kekekalan Momentum. Jika mula-mula roket diam, maka momentumnya sama dengan nol, sehingga berdasarkan Hukum Kekekalan dapat dinyatakan sebagai berikut:

$$m_1 v_1 + m_2 v_2 = 0$$

$$m_1 v_1 = -m_2 v_2 \dots\dots\dots (5.12)$$

Kecepatan akhir yang dicapai sebuah roket tergantung pada kecepatan semburan gas dan jumlah bahan bakar yang dibawanya.

Beberapa aplikasi Hukum Kekekalan Momentum antara lain adalah bola baja yang diayunkan dengan rantai untuk menghancurkan dinding tembok. Benturan meteor terhadap Bumi dapat dilihat di kawah Barringer, Winlow, Arizona, Amerika Serikat. Bola golf yang dipukul dengan stik golf juga menggunakan Hukum Kekekalan Momentum.



Gambar 5.9 Prinsip kerja roket memanfaatkan Hukum Kekekalan Momentum.

Uji Kemampuan 5.4

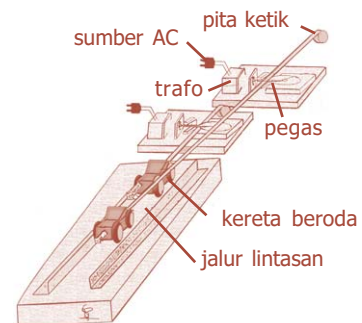
Jika gas buang roket keluar dengan massa 75 kg/s dan kecepatan semburan gas adalah 250 m/s, hitunglah gaya dorong pada roket!

Kegiatan

Tujuan : Mengetahui penerapan Hukum Kekekalan Momentum dalam Kehidupan Sehari-hari.
Alat dan bahan : *Ticker timer* (pewaktu ketik), mobil-mobilan, kereta troli, jalur lintasan, pita ketik.

Cara Kerja:

1. Rangkailah alat dan bahan seperti gambar di samping.
2. Gandenglah troli A dengan pengetik 1 dan troli B dengan pengetik 2. Bila menggunakan mobil-mobilan, gunakan mobil A dengan baterai baru dan B dengan baterai lama.
3. Letakkan troli B di depan troli A sejauh 30 cm.
4. Dalam kondisi troli B diam, jalankan troli A dengan menggunakan mekanik penggerak.



- Perhatikan mobil A akan menumbuk mobil B, dan keduanya akan bergerak.
- Ambillah kertas pita penetik dari penetik 1 dan 2. Penetik 1 untuk mobil A akan didapatkan kecepatan kereta sebelum dan sesudah tumbukan. Penetik 2 untuk kecepatan mobil sesudah tumbukan.
- Timbanglah kereta A (m_A) dan kereta B (m_B).
- Ulangilah langkah-langkah di atas untuk berbagai beban pada kereta A ($m_A + m_A'$) dan kereta B ($m_B + m_B'$).
- Ulangilah langkah-langkah di atas untuk kereta B bergerak dengan kecepatan lebih kecil dari kecepatan kereta A (untuk mobil baterai).
- Catatlah hasil percobaan dengan mengikuti format berikut ini.

m_A	m_B	m_A'	m_B'	$m_A + m_A'$	$m_B + m_B'$	v_A	v_A'	v_B	v_B'

Diskusi:

- Carilah harga:
 - $(m_A - m_A')v_A + (m_B + m_B')v_B$,
 - $(m_A - m_A')v_A + (m_B + m_B')v_B'$!
- Apakah yang dapat disimpulkan dari percobaan yang telah kalian lakukan?

Fiesta

Fisikawan Kita



Rene Descartes (1596 - 1650)

Filsuf dan ahli ilmu pasti alam yang lahir di La Haye, Touraine pada tanggal 31 Maret 1596 dan meninggal di Stockholm pada tanggal 11 Februari 1650. Ia pencetus pemikiran rasionalistis dan peletak dasar-dasar ilmu ukur analitik atau koordinat. Dengan tahap pemikiran rasional, Descartes ingin memecahkan masalah metode keragu-raguan. Dari tahapan demikian sampailah Descartes pada suatu kesimpulan yang terkenal: "Cogito ergo sum" (yang artinya aku berpikir, maka aku ada).

Descartes merumuskan Hukum Kekekalan Momentum: $m_1 \cdot v_1 + m_2 \cdot v_2 + m_3 \cdot v_3 + m_n \cdot v_n + \dots = \sum m \cdot v$. Penemuan ini diuji melalui serangkaian eksperimen oleh ilmuwan The Royal Society. Para ilmuwan tersebut akhirnya mendefinisikan besaran vektor yang merupakan hasil kali massa dengan vektor kecepatan.

Kilas Balik

- ✱ Setiap benda yang bergerak selalu memiliki momentum, yang besarnya merupakan hasil kali antara massa dengan kecepatan.

$$p = m \cdot v$$
- ✱ Impuls didefinisikan sebagai hasil kali gaya dengan selang waktu yang diperlukan.

$$I = F \Delta t$$
- ✱ Impuls merupakan perubahan momentum yang dialami benda.

$$F \Delta t = m \cdot v_2 - m \cdot v_1; I = p_2 - p_1$$
- ✱ Hukum Kekekalan Momentum:
 jika tidak ada gaya luar yang bekerja pada benda, maka jumlah momentum sebelum tumbukan sama dengan jumlah momentum setelah tumbukan, dituliskan: $m_1 \cdot v_1 + m_2 \cdot v_2 = m_1 \cdot v_1' + m_2 \cdot v_2'$
- ✱ Pada tumbukan lenting sempurna berlaku Hukum Kekekalan Momentum dan Hukum Kekekalan Energi Kinetik. Besarnya koefisien restitusi $e = 1$.

$$-\frac{(v_1' - v_2')}{v_1 - v_2} = 1$$
- ✱ Pada tumbukan lenting sebagian hanya berlaku Hukum Kekekalan Momentum, dengan koefisien restitusi, $0 < e < 1$.
- ✱ Pada tumbukan tidak lenting sama sekali, kedua benda setelah tumbukan bersatu sehingga kecepatan kedua benda setelah tumbukan sama, dengan koefisien restitusi, $e = 0$, dan $m_1 \cdot v_1 + m_2 \cdot v_2 = (m_1 + m_2)v'$.
- ✱ Prinsip kerja roket adalah berdasarkan Hukum Kekekalan Momentum.

$$m_1 \cdot v_1 = -m_2 \cdot v_2$$

Uji Kompetensi

A. Pilihlah jawaban yang paling tepat!

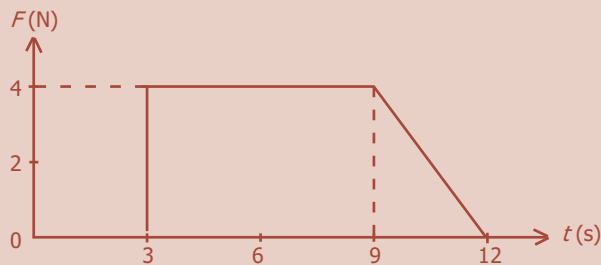
1. Rumus dimensi momentum adalah

a. $ML^{-2}T^{-2}$	d. $ML^{-1}T^{-1}$
b. $ML^{-1}T^{-2}$	e. MLT^{-1}
c. MLT^{-2}	
2. Bola A bergerak lurus dan mempunyai momentum $m \cdot v$ menumbuk bola B yang bergerak pada garis lurus yang sama. Jika tumbukan bola A mempunyai momentum $-3m \cdot v$, maka pertambahan momentum bola B adalah

a. $-4m \cdot v$	d. $3m \cdot v$
b. $-2m \cdot v$	e. $4m \cdot v$
c. $2m \cdot v$	

3. Sebuah bola yang massanya 100 gram dipukul dengan gaya 25 N dalam waktu 0,1 sekon. Jika mula-mula bola diam, maka kecepatan bola setelah dipukul adalah
 - a. 10 m/s
 - b. 15 m/s
 - c. 20 m/s
 - d. 25 m/s
 - e. 30 m/s
4. Dua buah titik bermassa $m_1 = 5$ kg dan $m_2 = 6$ kg terletak berdekatan pada bidang datar licin. Sistem ini mendapat impuls gaya hingga kedua benda bergerak dengan kecepatan $v_1 = 1$ m/s dan $v_2 = 2$ m/s dengan arah saling tegak lurus. Besarnya impuls gaya yang bekerja pada sistem adalah
 - a. 5 Ns
 - b. 7 Ns
 - c. 12 Ns
 - d. 13 Ns
 - e. 17 Ns
5. Sebuah bom yang diam tiba-tiba meledak dan pecah menjadi dua bagian yang bergerak dalam arah berlawanan. Perbandingan massa kedua bagian adalah $m_1 : m_2 = 1 : 2$. Jika energi yang dibebaskan adalah 3×10^5 joule, maka perbandingan energi kinetik pecahan pertama dan kedua adalah
 - a. 1 : 1
 - b. 1 : 3
 - c. 2 : 1
 - d. 5 : 1
 - e. 7 : 5
6. Pada tumbukan lenting sempurna berlaku Hukum Kekekalan
 - a. Momentum
 - b. Energi Kinetik
 - c. Energi Potensial
 - d. Momentum dan Energi Kinetik
 - e. Momentum dan Energi Potensial
7. Dua buah benda massanya masing-masing 10 kg dan 6 kg bergerak dalam bidang datar licin dengan kecepatan 4 m/s dan 6 m/s dalam arah yang berlawanan. Jika terjadi tumbukan lenting sempurna, maka kecepatan masing-masing benda setelah tumbukan adalah
 - a. 5 m/s dan 7 m/s searah gerak semula
 - b. 5 m/s dan 7 m/s berlawanan arah gerak semula
 - c. 6 m/s dan 10 m/s searah gerak semula
 - d. 6 m/s dan 10 m/s berlawanan arah gerak semula
 - e. 10 m/s dan 4 m/s berlawanan arah gerak semula
8. Peluru dengan massa 10 gram dan kecepatan 1.000 m/s mengenai dan menembus sebuah balok dengan massa 10 kg yang diam di atas bidang datar licin. Kecepatan peluru setelah menembus balok 100 m/s. Kecepatan balok setelah tertembus peluru adalah
 - a. 0,09 m/s
 - b. 0,9 m/s
 - c. 9 m/s
 - d. 90 m/s
 - e. 900 m/s

9. Grafik di bawah ini menyatakan hubungan gaya F yang bekerja pada benda bermassa 3 kg terhadap waktu t selama gaya itu bekerja. Jika benda mula-mula diam, maka kecepatan akhir benda adalah



- a. 25 m/s
b. 20 m/s
c. 15 m/s
d. 10 m/s
e. 5 m/s
10. Bola jatuh dari ketinggian 4 m di atas lantai mendatar ternyata tinggi pantulan pertama adalah 2,5 m. Jika bola dijatuhkan dari ketinggian 6,4 m, maka tinggi pantulan pertama adalah
- a. 4 m
b. 3 m
c. 2,5 m
d. 2 m
e. 1 m

B. Jawablah dengan singkat dan benar!

- Sebuah bola bermassa 2 kg diam ditendang dengan gaya 100 N dalam waktu 0,2 sekon. Hitunglah:
 - impuls, dan
 - kecepatan bola sesaat setelah ditendang!
- Seorang joki dengan massa 60 kg naik seekor kuda yang bermassa 200 kg yang bergerak dengan kecepatan 8 m/s. Pada suatu saat joki tersebut meloncat dari kuda dengan kecepatan 3 m/s terhadap kuda. Berapakah kecepatan kuda sesaat setelah joki meloncat, jika joki meloncat:
 - searah kuda,
 - berlawanan arah!
- Bola dengan massa 4 kg bergerak ke kiri dengan kecepatan 10 m/s menumbuk bola lain dengan massa 6 kg yang mula-mula diam. Jika tumbukannya lenting sempurna, hitunglah kecepatan masing-masing bola setelah tumbukan!
- Sebuah truk yang massanya 2.000 kg dan melaju dengan kecepatan 36 km/jam menabrak sebuah pohon dan berhenti dalam waktu 0,1 sekon. Hitunglah gaya rata-rata pada truk saat terjadi tabrakan!
- Dua benda massanya masing-masing 2 kg dan 4 kg bergerak saling mendekat dengan kecepatan 10 m/s dan 4 m/s. Jika terjadi tumbukan lenting sebagian dengan koefisien restitusi 0,5, tentukan:
 - kecepatan masing-masing benda setelah tumbukan,
 - energi kinetik yang hilang setelah tumbukan!

Uji Kompetensi Semester 1

A. Pilihlah jawaban yang paling tepat!

1. Sebuah benda bergerak lurus sepanjang sumbu x dengan persamaan posisi $\mathbf{r} = (2t^2 + 6t + 8)\mathbf{i}$ m. Kecepatan benda tersebut adalah
 - a. $(-4t + 6)\mathbf{i}$ m/s
 - b. $-4\mathbf{i}$ m/s
 - c. $2\mathbf{i}$ m/s
 - d. $10\mathbf{i}$ m/s
 - e. $(4t + 6)\mathbf{i}$ m/s
2. Benda bergerak sepanjang sumbu x dengan persamaan $\mathbf{r} = t^2 - 4t + 5$, \mathbf{r} dalam meter dan t dalam sekon. Kecepatan benda pada saat $t = 5$ sekon adalah
 - a. 2 m
 - b. 4 m
 - c. 6 m
 - d. 8 m
 - e. 10 m
3. Sebuah partikel bergerak dengan persamaan kecepatan $\mathbf{v} = 2t + 5$, \mathbf{v} dalam m/s dan t dalam sekon. Jika posisi awal benda 6 m, maka posisi benda setelah bergerak 2 sekon adalah
 - a. 8 m/s
 - b. 10 m/s
 - c. 14 m/s
 - d. 15 m/s
 - e. 20 m/s
4. Sebuah benda bergerak dengan kecepatan $\mathbf{v} = (-5t + 40)\mathbf{i} + (10t + 30)\mathbf{j}$ m/s. Percepatan benda itu adalah
 - a. 5 m/s^2
 - b. $5\sqrt{5} \text{ m/s}^2$
 - c. 15 m/s^2
 - d. 30 m/s^2
 - e. 40 m/s^2
5. Sebuah peluru ditembakkan dari bidang mendatar dengan kecepatan awal 40 m/s dan sudut elevasi α ($\cos \alpha = \frac{3}{5}$). Jika percepatan gravitasi $g = 10 \text{ m/s}^2$, maka kecepatan peluru setelah bergerak $2\frac{1}{2}$ sekon adalah
 - a. 15 m/s
 - b. 20 m/s
 - c. 25 m/s
 - d. 30 m/s
 - e. 35 m/s
6. Peluru ditembakkan dengan kecepatan awal 100 m/s dengan membentuk sudut α terhadap bidang horizontal. Jika jarak terjauh yang dicapai peluru $500\sqrt{3}$ m dan $g = 10 \text{ m/s}^2$, maka besarnya α adalah
 - a. 15°
 - b. 30°
 - c. 37°
 - d. 45°
 - e. 53°
7. Sebuah benda berotasi dengan posisi sudut $\theta = t^2 + 2t + 5$ (θ dalam radian dan t dalam sekon). Kecepatan sudut rata-rata selama 5 sekon pertama adalah
 - a. 5 rad/s
 - b. 7 rad/s
 - c. 8 rad/s
 - d. 10 rad/s
 - e. 12 rad/s

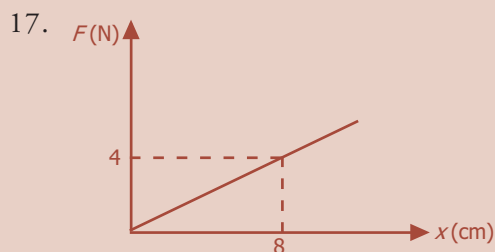
8. Sebuah bandul bergerak melingkar dengan jari-jari 50 cm dan kecepatan linier 4 m/s. Bandul itu mengalami perlambatan sudut $0,4 \text{ rad/s}^2$. Bandul itu akan berhenti setelah
 - a. 125 s
 - b. 50 s
 - c. 40 s
 - d. 20 s
 - e. 10 s
9. Dua benda berjarak 4 m satu sama lain, ternyata gaya gravitasi keduanya sebesar 12 N. Jika jarak kedua benda diubah menjadi 8 m, maka gaya gravitasinya menjadi
 - a. 2 N
 - b. 3 N
 - c. 4 N
 - d. 5 N
 - e. 6 N
10. Jarak antara pusat bumi dan pusat bulan adalah d . Massa bulan $\frac{1}{81}$ massa bumi. Jika sebuah benda terletak antara Bumi dan Bulan dan tidak memiliki berat, maka jarak benda tersebut terhadap Bumi adalah
 - a. $0,5d$
 - b. $0,6d$
 - c. $0,7d$
 - d. $0,8d$
 - e. $0,9d$
11. Sebuah satelit komunikasi sebelum diorbitkan, di permukaan bumi, beratnya 3.600 N. Besarnya gaya gravitasi bumi yang memengaruhi satelit pada saat satelit mengorbit Bumi pada ketinggian 2 kali jari-jari Bumi dihitung dari permukaan bumi adalah
 - a. 400 N
 - b. 800 N
 - c. 1.800 N
 - d. 2.400 N
 - e. 2.800 N
12. Massa dan garis tengah sebuah planet masing-masing empat kali massa bumi. Jika Bumi dan planet lain dianggap sebagai suatu bola dengan massa jenis serba sama, maka nilai perbandingan percepatan gravitasi di Bumi dan planet adalah
 - a. 1 : 1
 - b. 1 : 4
 - c. 1 : 16
 - d. 4 : 1
 - e. 16 : 1
13. Perbandingan jarak rata-rata planet A dan B terhadap Matahari adalah 9 : 4. Jika periode planet B 88 hari, maka periode planet A adalah
 - a. 198 hari
 - b. 297 hari
 - c. 352 hari
 - d. 532 hari
 - e. 792 hari
14. Dimensi dari konstanta gaya pegas adalah
 - a. MT^{-2}
 - b. ML^{-2}
 - c. MLT^{-2}
 - d. MT
 - e. MT^2

15. Sebuah batang elastik 4 m memiliki luas penampang $1,5 \text{ cm}^2$. Batang tersebut digantungi beban 330 kg ternyata meregang 0,7 mm. Besarnya modulus Young bahan batang tersebut adalah

a. $1,26 \times 10^{11} \text{ N/m}^2$
 b. $1,5 \times 10^{11} \text{ N/m}^2$
 c. $3,3 \times 10^{11} \text{ N/m}^2$
 d. $4,32 \times 10^{11} \text{ N/m}^2$
 e. $5,26 \times 10^{11} \text{ N/m}^2$

16. Dimensi modulus elastisitas sama dengan dimensi

a. luas
 b. tetapan pegas
 c. gaya
 d. regangan
 e. tegangan



Grafik di samping menunjukkan pertambahan panjang karet akibat pengaruh gaya yang berbeda-beda. Besar energi potensial karet pada pertambahan panjang 8 cm adalah ...

a. 0,15 J
 b. 0,16 J
 c. 0,24 J
 d. 0,25 J
 e. 0,27 J

18. Dua buah pegas masing-masing dengan konstanta gaya 150 N/m. Apabila ujung bawah pegas diberi beban 6 kg ($g = 10 \text{ m/s}^2$), maka perbandingan energi potensial jika pegas disusun paralel dan seri adalah

a. 1 : 2
 b. 1 : 4
 c. 1 : 10
 d. 2 : 5
 e. 3 : 5

19. Sebuah pegas jika menggantung dalam keadaan normal panjangnya 20 cm. Bila pada ujung pegas digantungi beban yang bermassa 50 gram, maka panjang pegas menjadi 25 cm ($g = 10 \text{ m/s}^2$). Apabila pegas disimpangkan sejauh 4 cm, maka energi potensial elastis pegas adalah

a. 0,008 J
 b. 0,016 J
 c. 0,2 J
 d. 0,4 J
 e. 2 J

20. Sebuah benda yang diikat dengan seutas benang hanya dapat berayun dengan simpangan kecil. Supaya periode ayunannya bertambah besar, maka
- ayunannya diberi simpangan awal yang lebih besar
 - ayunan diberi kecepatan awal
 - benang penggantung diperpanjang
 - massa benda ditambah
 - massa benda diperkecil
21. Pada getaran harmonik pegas, jika massa beban yang digantung pada ujung bawah pegas 1 kg, maka periode getarannya 2 sekon. Jika beban ditambah sehingga menjadi 4 kg, maka periode getarannya adalah
- 0,25 sekon
 - 0,5 sekon
 - 1 sekon
 - 4 sekon
 - 8 sekon
22. Sebuah benda bergerak harmonik sederhana dengan persamaan $y = 10 \sin 28t$, dengan t dalam sekon. Frekuensi benda tersebut adalah
- 10 Hz
 - 50 Hz
 - 100 Hz
 - 200 Hz
 - 400 Hz
23. Suatu benda yang melakukan gerak harmonik sederhana dengan amplitudo 9 cm dan periode getarannya $\frac{\pi}{6}$ sekon, maka besar kecepatan pada saat simpangannya sama dengan nol adalah
- 0
 - 0,12 m/s
 - 0,18 m/s
 - 1,08 m/s
 - 10,8 m/s
24. Sebuah benda melakukan gerak harmonik dengan amplitudo A pada saat kecepatannya sama dengan setengah kecepatan maksimum. Maka simpangannya adalah
- $1A$
 - $0,87A$
 - $0,64A$
 - $0,5A$
 - 0
25. Sebuah benda bermassa 5 gram digetarkan menurut persamaan simpangan $x = (4 \times 10^{-2}) \sin 100t$, dengan x dalam meter dan t dalam sekon. Energi total benda itu adalah
- 0
 - 4×10^{-4} J
 - 8×10^{-4} J
 - 4×10^{-2} J
 - 8×10^{-2} J

26. Suatu gaya $F = 10 \text{ N}$, besar dan arahnya tetap. Titik tangkap gaya menggeser sepanjang garis lurus yang panjangnya 5 m . Gaya F membentuk sudut θ terhadap arah perpindahan. Ternyata gaya F melakukan usaha sebesar $25\sqrt{2}$ joule. Besar sudut θ adalah
- 0°
 - 30°
 - 37°
 - 45°
 - 60°
27. Sebuah benda bermassa 20 kg terletak pada bidang miring dengan sudut 30° terhadap bidang horizontal. Jika percepatan gravitasi $9,8 \text{ m/s}^2$ dan benda bergerak sejauh 3 meter ke arah bawah, usaha yang dilakukan gaya berat adalah
- 60 J
 - $65,3 \text{ J}$
 - 294 J
 - $294\sqrt{3} \text{ J}$
 - 588 J
28. Sebuah benda bermassa 3 kg mula-mula diam, kemudian bergerak lurus dengan percepatan 2 m/s^2 . Usaha yang diubah menjadi energi kinetik setelah 2 sekon adalah
- 6 J
 - 12 J
 - 24 J
 - 48 J
 - 72 J
29. Seorang anak mendorong tembok sebuah gedung dengan gaya 200 N selama 10 sekon . Tembok tidak bergerak. Besar usaha yang dilakukan oleh anak itu adalah
- 0
 - 20 J
 - 40 J
 - 100 J
 - 200 J
30. Benda bergerak dengan kecepatan v , mempunyai energi kinetik sebesar Ek . Apabila kecepatan benda menjadi $2v$, maka energi kinetik benda menjadi ...
- $\frac{1}{2} Ek$
 - $2Ek$
 - $3Ek$
 - $4Ek$
 - $5Ek$

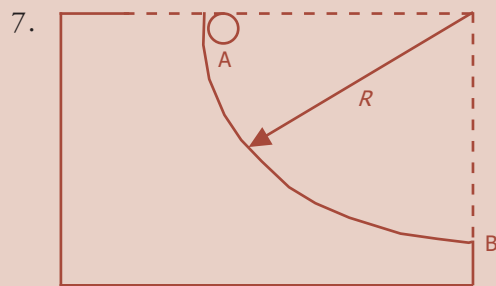
31. Sebuah peluru dengan massa 200 gram ditembakkan vertikal ke atas dari permukaan tanah dengan kecepatan 60 m/s. Jika $g = 10 \text{ m/s}^2$, maka energi kinetik peluru pada ketinggian 40 m dari tanah adalah
- 80 J
 - 160 J
 - 280 J
 - 360 J
 - 420 J
32. Benda yang jatuh bebas dari ketinggian tertentu, semakin ke bawah maka ...
- energi potensialnya bertambah
 - energi kinetiknya berkurang
 - energi mekaniknya tetap
 - energi totalnya berkurang
 - energi potensial dan energi kinetik bertambah
33. Sebuah mobil bermassa m memiliki mesin berdaya P . Jika pengaruh gesekan kecil, maka waktu minimum yang diperlukan mobil agar mencapai kecepatan v dari keadaan diam adalah
- $\frac{1}{4}$
 - $\frac{P}{mv}$
 - $\frac{2P}{mv^2}$
 - $\frac{mv^2}{2P}$
 - $\frac{mv^2}{P}$
34. Di antara benda berikut ini yang akan mengalami gaya terbesar bila menumbuk tembok berhenti dalam selang waktu yang sama adalah
- benda bermassa 40 kg dengan kecepatan 25 m/s
 - benda bermassa 50 kg dengan kecepatan 15 m/s
 - benda bermassa 100 kg dengan kecepatan 10 m/s
 - benda bermassa 150 kg dengan kecepatan 7 m/s
 - benda bermassa 200 kg dengan kecepatan 5 m/s
35. Benda yang massanya 500 gram bergerak lurus di atas lantai dengan kecepatan 5 m/s. Dua sekon kemudian kecepatannya menjadi 10 m/s. Besarnya gaya yang bekerja pada benda tersebut adalah
- 1,50 N
 - 1,25 N
 - 1,00 N
 - 0,50 N
 - 0,25 N
36. Seseorang naik perahu yang bergerak dengan kecepatan 4 m/s. Massa orang tersebut 60 kg dan massa perahu 80 kg. Tiba-tiba orang tersebut melompat ke dalam air dengan kecepatan 2 m/s berlawanan arah dengan gerak perahu. Maka kecepatan perahu sesaat setelah orang melompat adalah
- 4,5 m/s
 - 5,5 m/s
 - 6,5 m/s
 - 7,5 m/s
 - 8,5 m/s

37. Benda P yang massanya 0,5 kg bergerak dengan kelajuan 10 m/s mengejar dan menumbuk benda Q yang massanya 1 kg yang bergerak dengan kelajuan 4 m/s. Setelah tumbukan, keduanya melekat dan bergerak bersama-sama. Kecepatan kedua benda adalah
- 6 m/s
 - 7 m/s
 - 9 m/s
 - 10 m/s
 - 14 m/s
38. Sebuah bola A yang mempunyai momentum p bertumbukan dengan bola B sehingga setelah tumbukan momentum bola A tersebut menjadi $3p$. Maka perubahan momentum bola B adalah
- $-3p$
 - $-2p$
 - p
 - $2p$
 - $4p$
39. Sebuah benda menumbuk balok yang diam di atas lantai dengan kecepatan 20 m/s. Setelah tumbukan balok terpental dengan kecepatan 15 m/s searah dengan kecepatan benda semula. Kecepatan benda setelah tumbukan bila besar koefisien restitusi $e = 0,4$ adalah
- 7 m/s searah dengan kecepatan semula
 - 7 m/s berlawanan arah dengan kecepatan semula
 - 8 m/s searah dengan kecepatan semula
 - 8 m/s berlawanan arah dengan kecepatan semula
 - 10 m/s searah dengan kecepatan semula
40. Bola yang massanya 200 gram dijatuhkan dari ketinggian 5 m di atas lantai mendatar. Jika koefisien tumbukan antara bola dan lantai 0,5, maka ketinggian bola setelah memantul dari lantai adalah
- 3,50 m
 - 2,50 m
 - 2,0 m
 - 1,50 m
 - 1,25 m

B. Jawablah dengan singkat dan benar!

- Kecepatan sebuah partikel dinyatakan oleh $v = 4t^2 + 2t - 6$, dengan v dalam m/s dan t dalam sekon. Jika posisi benda mula-mula 3 m, tentukan:
 - posisi benda setelah 3 sekon,
 - percepatan pada saat $t = 2$ sekon, dan
 - percepatan rata-rata antara $t = 0$ hingga $t = 3$ sekon!

2. Sebuah benda berotasi dengan persamaan posisi sudut $\theta = 2t^2 + 10t + 10$, θ dalam radian dan t dalam sekon. Hitunglah:
 - a. kecepatan sudut rata-rata selama 5 sekon pertama,
 - b. kecepatan sudut pada saat $t = 2$ sekon!
3. Sebuah pesawat ruang angkasa yang massanya 10 ton berada pada jarak sebesar diameter bumi dari pusat bumi. Jika percepatan gravitasi di permukaan bumi $9,8 \text{ m/s}^2$, berapakah gaya gravitasi bumi yang bekerja pada pesawat tersebut?
4. Dua pegas memiliki konstanta k_1 dan k_2 , dengan $k_1 = 100 \text{ N/m}$. Kedua pegas disusun paralel dan ujungnya diberi beban 60 N sehingga energi potensialnya 6 J. Tentukan besarnya konstanta k_2 !
5. Sebuah benda yang massanya 3 kg melakukan getaran selaras dengan periode 2 sekon dan amplitudo 10 cm. Tentukan gaya yang bekerja pada saat simpangannya 6 cm!
6. Suatu partikel melakukan gerak harmonik dengan amplitudo 10 cm. Energi mekanik getaran $4 \times 10^{-2} \text{ J}$. Berapakah simpangan getaran pada saat energi kinetiknya $3 \times 10^{-2} \text{ J}$?

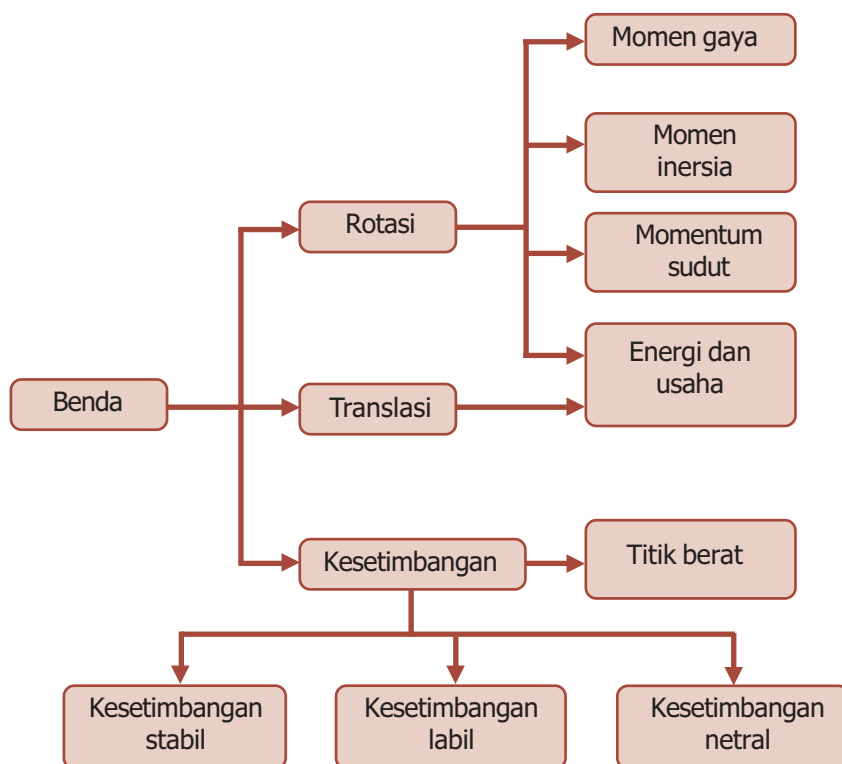


Sebuah benda yang massanya 0,5 kg dilepas dari A dan meluncur melalui lintasan AB yang berupa $\frac{1}{4}$ lingkaran yang licin dengan jari-jari 4 m. Jika $g = 10 \text{ m/s}^2$, tentukan:

- a. kecepatan benda saat tepat di B,
 - b. energi kinetik benda saat di B!
8. Benda yang massanya 10 kg bergerak di atas lantai kasar dengan kelajuan 8 m/s . Setelah bergerak sejauh 16 m benda berhenti. Hitunglah besarnya usaha yang dilakukan oleh gaya gesek sampai benda itu berhenti!
 9. Dua kelereng massanya sama, bertumbukan secara lenting sempurna dalam arah yang berlawanan. Kecepatan awal kedua kelereng masing-masing 2 m/s dan 4 m/s . Tentukan kecepatan kedua kelereng setelah tumbukan!
 10. Benda A massanya 60 gram dalam keadaan tergantung pada seutas tali yang panjangnya 90 cm. Benda B yang massanya 20 gram menumbuk benda A dengan kecepatan mendatar sebesar 6 m/s . Jika tumbukan bersifat lenting sempurna dan $g = 10 \text{ m/s}^2$, tentukan sudut simpangan maksimum tali setelah tumbukan!

PETA KONSEP

Bab 6 Dinamika Rotasi dan Keseimbangan Benda Tegar



BAB

6

DINAMIKA ROTASI DAN KESETIMBANGAN BENDA TEGAR



- Korsel gantung yang bergerak melakukan gerakan melingkar.

Sumber: *Jendela Iptek Ruang dan Waktu*, PT Balai Pustaka, 2000

Gerak suatu benda berdasarkan lintasannya dibedakan menjadi tiga, yaitu gerak lurus, gerak parabola, dan gerak melingkar. Pada gerak melingkar atau gerak rotasi, benda bergerak berputar pada porosnya. Perhatikan gambar di atas. Korsel gantung dikatakan melakukan gerak rotasi karena lintasannya berbentuk lingkaran dan ada sumbu sebagai pusatnya. Bagaimana dengan dinamika gerak rotasi tersebut?

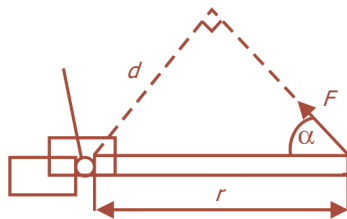
Kata Kunci

kecepatan sudut, momen gaya, momen inersia, momentum sudut, percepatan sudut, resultan gaya, rotasi, titik berat

Gerak rotasi benda dapat diamati dalam berbagai peristiwa di lingkungan kalian. Bola yang menggelinding, gerak engsel pada pintu, gerakan katrol, sekrup, dan roda merupakan contoh gerak rotasi benda. Sebagian besar gerak rotasi yang dialami benda tidak terjadi dengan sendirinya, tetapi ada sesuatu yang menyebabkan benda tersebut berotasi. Pada bab ini kalian akan mempelajari bagaimana sebuah benda dapat berotasi dan apa yang menyebabkannya. Beberapa besaran yang berkaitan dengan dinamika rotasi adalah momen gaya, momen inersia, dan momentum sudut.



A. Momen Gaya (Torsi)



Gambar 6.1 Momen gaya menyebabkan gerak rotasi benda.

Penyebab gerak suatu benda adalah **gaya**. Pada gerak rotasi, sesuatu yang menyebabkan benda untuk berotasi atau berputar disebut momen gaya atau torsi. Konsep torsi dapat dilihat pada saat kita membuka pintu. Cobalah membuka pintu dari bagian yang dekat dengan engsel. Bagaimanakah gaya yang kalian keluarkan? Sekarang, cobalah kembali membuka pintu dari bagian paling jauh dari engsel. Bandingkan gaya yang diperlukan antara dua perlakuan tersebut. Tentu saja membuka pintu dengan cara mendorong bagian yang jauh dari engsel lebih mudah dibandingkan dengan mendorong bagian yang dekat dari engsel. Gambar 6.1 menunjukkan sebuah pintu yang tampak dari atas. Gaya dorong F diberikan pada pintu dengan membentuk sudut α terhadap arah mendatar. Semakin besar gaya yang diberikan, semakin cepat pintu terbuka. Semakin besar jarak engsel dari tempat gaya bekerja, maka semakin besar momen gaya sehingga pintu lebih mudah terbuka.

Momen gaya didefinisikan sebagai hasil kali antara gaya dengan jarak titik ke garis kerja gaya pada arah tegak lurus. Dari Gambar 6.1, maka besarnya momen gaya adalah:

$$\tau = Fd = Fr \sin \alpha \quad (6.1)$$

dengan:

τ = momen gaya (Nm)

F = gaya yang bekerja (N)

r = jarak atau lengan (m)

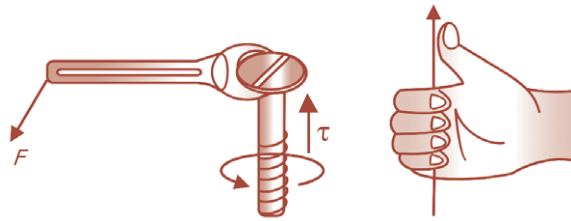
Momen gaya merupakan besaran vektor, sehingga persamaan (6.1) dapat dinyatakan dalam bentuk:

$$\tau = r \times F \quad (6.2)$$

Momen gaya total pada suatu benda yang disebabkan oleh dua buah gaya atau lebih yang bekerja terhadap suatu proses dirumuskan:

$$\sum \tau = \tau_1 + \tau_2 + \tau_3 + \dots + \tau_n$$

Arah momen gaya (τ) tegak lurus terhadap r dan F . Jika r dan F terletak pada bidang yang tegak lurus sumbu putar, maka vektor τ arahnya sepanjang sumbu putar menurut kaidah tangan kanan seperti ditunjukkan pada Gambar 6.2. Genggaman jari bertindak sebagai arah rotasi, dan ibu jari sebagai momen gaya.



Gambar 6.2 Arah momen gaya memenuhi kaidah tangan kanan.

Contoh Soal

Dua roda silinder dengan jari-jari $r_1 = 30$ cm dan $r_2 = 50$ cm disatukan dengan sumbu yang melewati pusat keduanya, seperti pada gambar. Hitunglah momen gaya total pada roda gabungan!

Penyelesaian:

Diketahui: $r_1 = 30$ cm = 0,3 m

$r_2 = 50$ cm = 0,5 m

$F_1 = -50$ N (berlawanan arah jarum jam)

$F_2 = +50$ N (searah jarum jam)

Ditanya: $\sum \tau = \dots ?$

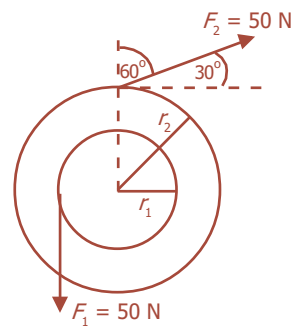
Jawab:

Komponen gaya F_2 yang tegak lurus r_2 adalah:

$F_2 \sin 60^\circ$

sehingga:

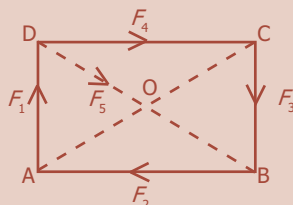
$$\sum \tau = \tau_2 - \tau_1 = r_2 \cdot F_2 \sin 60^\circ - r_1 F_1 = 0,5 \times 50 \times \left(\frac{1}{2}\sqrt{3}\right) - (0,3 \times 50) = 6,65 \text{ Nm}^2$$



Uji Kemampuan 6.1

1. Besar momen gaya suatu benda adalah 24 Nm dan gaya yang digunakan adalah 4 N. Jika gaya tersebut tegak lurus terhadap lengan, berapakah besar lengan momen gaya tersebut?

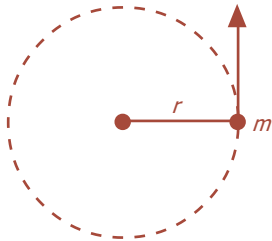
- 2.



Persegi panjang di samping berukuran AD = 9 cm dan AB = 12 cm. Gaya yang bekerja pada F_1 , F_2 , F_3 , F_4 , dan F_5 masing-masing sebesar 8 N, 12 N, 14 N, 16 N, dan 18 N. Hitunglah momen gaya total terhadap titik O!



B. Momen Inersia



Gambar 6.3 Momen inersia sebuah partikel terhadap sumbu rotasi.

Momen inersia menyatakan bagaimana massa benda yang berotasi didistribusikan di sekitar sumbu rotasinya. Apabila sistem yang berotasi adalah sebuah partikel yang bermassa m dan berada pada jarak r dari sumbu rotasi, maka momen inersia partikel tersebut merupakan hasil kali massa partikel dengan kuadrat jaraknya dari sumbu rotasi (Gambar 6.3). Secara matematis dirumuskan:

$$I = m \cdot r^2 \dots\dots\dots (6.3)$$

dengan:

I = momen inersia (kgm^2)

m = massa benda (kg)

r = jarak partikel dari sumbu putar (m)

Jika terdapat sejumlah partikel yang melakukan gerak rotasi, maka momen inersia total merupakan jumlah momen inersia setiap partikel.

$$I = \sum m \cdot r^2 = m_1 \cdot r_1^2 + m_2 \cdot r_2^2 + \dots + m_n \cdot r_n^2 \dots\dots\dots (6.4)$$

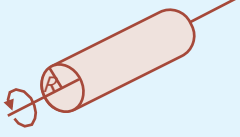
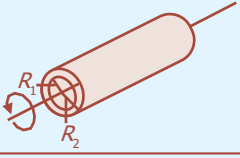
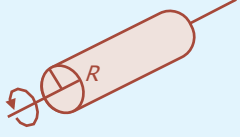
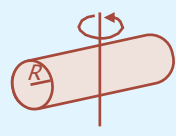
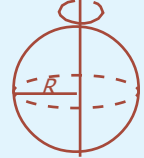

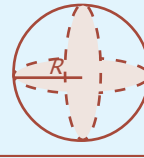
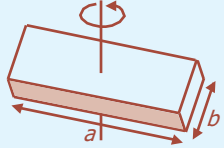
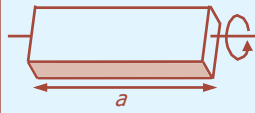
Apabila benda yang berotasi terdiri atas susunan partikel kontinu, seperti benda tegar, maka momen inersia dihitung dengan metode integral sebagai berikut:

$$I = \int r^2 \cdot dm$$

Besarnya momen inersia tergantung pada bentuk benda, jarak sumbu putar ke pusat massa, dan posisi benda relatif terhadap sumbu putar. Tabel 6.1 menunjukkan momen inersia beberapa benda tegar.

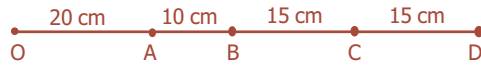
Tabel 6.1 Momen inersia berbagai benda tegar homogen

No.	Gambar	Nama Benda	Letak Sumbu Putar	Momen Inersia
1.		batang homogen panjang ℓ	melalui pusat	$I = \frac{1}{12} m \cdot \ell^2$
2.		batang homogen panjang ℓ	melalui ujung	$I = \frac{1}{3} m \cdot \ell^2$

3.		silinder tipis berongga dengan jari-jari R	melalui sumbunya	$I = M.R^2$
4.		silinder tebal berongga dengan jari-jari dalam R_1 dan jari-jari luar R_2	melalui sumbunya	$I = \frac{1}{2} M(R_1^2 + R_2^2)$
5.		silinder pejal dengan jari-jari R	melalui sumbunya	$I = \frac{1}{2} M.R^2$
6.		silinder pejal dengan jari-jari R	melalui pusat	$I = \frac{1}{4} M.R^2 + \frac{1}{12} M.\ell^2$
7.		bola pejal dengan jari-jari R	melalui pusat	$I = \frac{2}{5} M.R^2$
8.		bola pejal	melalui ujung	$I = \frac{7}{5} M.R^2$
9.		bola berongga dengan jari-jari R	melalui pusat	$I = \frac{2}{3} M.R^2$
10.		lempeng tipis dengan panjang a dan lebar b	melalui pusat	$I = \frac{1}{12} M(a^2 + b^2)$
11.		lempeng tipis dengan panjang a	melalui sumbunya	$I = \frac{1}{12} M.a^2$

Contoh Soal

Empat buah partikel A, B, C, dan D masing-masing bermassa 200 gram, 350 gram, 400 gram, dan 150 gram disusun seperti gambar berikut ini.



Tentukan momen inersia sistem di atas terhadap pusat rotasi melalui ujung batang!

Penyelesaian:

Diketahui: $m_A = 200 \text{ gram} = 0,2 \text{ kg}$ $OA = 20 \text{ cm} = 0,2 \text{ m}$
 $m_B = 350 \text{ gram} = 0,35 \text{ kg}$ $OB = 30 \text{ cm} = 0,3 \text{ m}$
 $m_C = 400 \text{ gram} = 0,4 \text{ kg}$ $OC = 45 \text{ cm} = 0,45 \text{ m}$
 $m_D = 150 \text{ gram} = 0,15 \text{ kg}$ $OD = 60 \text{ cm} = 0,6 \text{ m}$

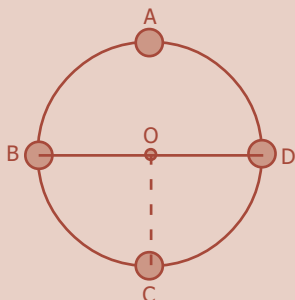
Ditanya: $I = \dots ?$

Jawab:

$$\begin{aligned} I &= (m_A \cdot OA^2) + (m_B \cdot OB^2) + (m_C \cdot OC^2) + (m_D \cdot OD^2) \\ &= (0,2(0,2)^2) + (0,35(0,3)^2) + (0,4(0,45)^2) + (0,15(0,6)^2) \\ &= (8 \times 10^{-3}) + (31,5 \times 10^{-3}) + (81 \times 10^{-3}) + (54 \times 10^{-3}) \\ &= 174,5 \times 10^{-3} \text{ kgm}^2 = 0,17 \text{ kgm}^2 \end{aligned}$$

Uji Kemampuan 6.2

1.

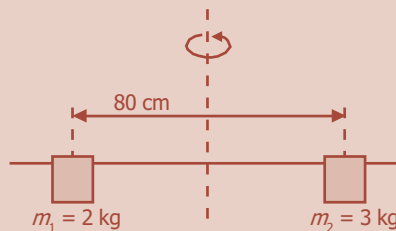


Empat buah partikel A, B, C, dan D dengan massa sama yaitu 300 gram dengan jari-jari 40 cm dihubungkan melingkar seperti tampak pada gambar di samping. Berapakah momen inersia sistem terhadap:

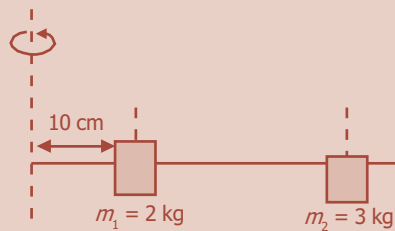
- pusat lingkaran (O),
- diameter BD!

2. Dua beban dengan massa 2 kg dan 3 kg diletakkan dengan jarak 80 cm satu sama lain pada sebuah batang yang ringan. Hitunglah momen inersia sistem, jika batang diputar horizontal dengan sumbu putar:

a.



b.



- di tengah kedua benda (lihat gambar),
- terletak 10 cm di sebelah kiri massa 2 kg!



Hubungan antara Momen Gaya dengan Percepatan Sudut

Gambar 6.4 menunjukkan sebuah partikel dengan massa m berotasi membentuk lingkaran dengan jari-jari r akibat pengaruh gaya tangensial F .

Berdasarkan Hukum II Newton, maka:

$$F = m \cdot a_t \quad (6.5)$$

Jika kedua sisi dikalikan r , maka:

$$r \cdot F = r(m \cdot a_t)$$

Karena momen gaya $\tau = r \cdot F$ dan percepatan tangensial

$$a_t = r \cdot \alpha, \text{ maka:}$$

$$r \cdot F = r \cdot m \cdot r \cdot \alpha$$

$$r \cdot F = m \cdot r^2 \cdot \alpha$$

$$\tau = m \cdot r^2 \cdot \alpha$$

Mengingat $I = m \cdot r^2$, maka:

$$\tau = I \cdot \alpha \quad (6.6)$$

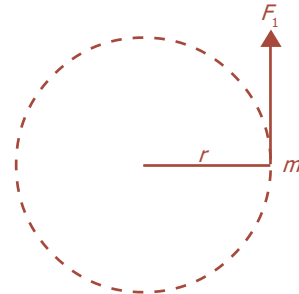
dengan:

τ = momen gaya (Nm)

I = momen inersia (kgm^2)

α = percepatan sudut (rad/s^2)

Persamaan (6.6) merupakan rumusan Hukum II Newton pada gerak rotasi.



Gambar 6.4 Sebuah partikel berotasi akibat pengaruh gaya tangensial.

Contoh Soal

Sebuah roda berbentuk cakram homogen dengan jari-jari 50 cm dan massa 200 kg. Jika momen gaya yang bekerja pada roda 250 Nm, hitunglah percepatan sudut roda tersebut!

Penyelesaian:

Diketahui: $r = 50 \text{ cm} = 0,5 \text{ m}$

$m = 200 \text{ kg}$

$\tau = 250 \text{ Nm}$

Ditanya: $\alpha = \dots ?$

Jawab:

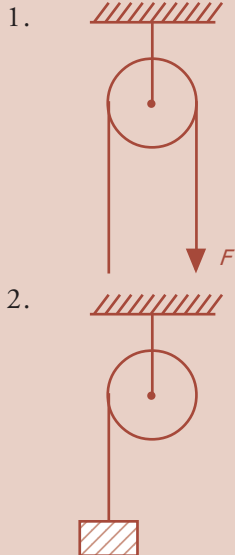
$$I = \frac{1}{2} m \cdot r^2 = \frac{1}{2} (200)(0,5)^2$$

$$\tau = I \cdot \alpha$$

$$250 = 25 \alpha$$

$$\alpha = 10 \text{ rad/s}^2$$

Uji Kemampuan 6.3



1. Gaya sebesar 18 N bekerja pada tali yang dililitkan pada katrol yang berjari-jari 36 cm. Katrol berputar dengan kecepatan sudut 25 rad/s selama 5 sekon. Jika antara tali dan katrol ada momen inersia sebesar 2 kgm², hitunglah momen gaya katrol!

2. Beban dengan massa 18 kg ($g = 10 \text{ m/s}^2$) digantungkan pada katrol yang berjari-jari 24 cm. Jika momen gaya sebesar 4 Nm dan momen inersia sebesar 2 kgm², tentukan:

- percepatan sudut,
- kecepatan sudut pada $t = 5 \text{ s}$!



D. Energi dan Usaha Gerak Rotasi

Setiap benda bergerak memiliki energi kinetik. Pada saat berotasi, benda memiliki energi gerak yang disebut energi kinetik rotasi, yang besarnya:

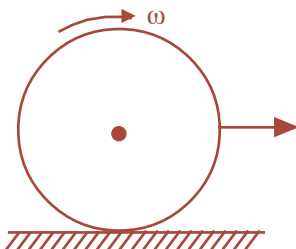
$$Ek = \frac{1}{2} m.v^2$$

Kecepatan linier, $v = r.\omega$, maka:

$$Ek = \frac{1}{2} m(r.\omega)^2 = \frac{1}{2} m.r^2.\omega^2$$

Karena $m.r^2 = I$, maka energi kinetik rotasi adalah:

$$Ek = \frac{1}{2} I.\omega^2 \dots\dots\dots (6.7)$$



Gambar 6.5 Besarnya energi kinetik benda menggelinding merupakan jumlah energi kinetik rotasi dan energi kinetik translasi.

Untuk benda yang bergerak menggelinding di atas bidang seperti pada Gambar 6.5, benda mengalami dua gerakan sekaligus yaitu gerak rotasi terhadap sumbu bola dan gerak translasi terhadap bidang.

Besarnya energi kinetik yang dimiliki benda merupakan jumlah energi kinetik rotasi dengan energi kinetik translasi, sehingga dirumuskan:

$$Ek = Ek_R + Ek_T$$

$$Ek = \frac{1}{2} I.\omega^2 + \frac{1}{2} m.v^2 \dots\dots\dots (6.8)$$

Perhatikan Gambar 6.6. Usaha yang dilakukan pada benda yang berotasi dapat ditentukan berikut ini.

Sebuah roda berotasi pada sumbu tetap dalam selang waktu Δt , sebuah titik pada roda tersebut menempuh sudut θ dan lintasan sejauh s . Usaha yang dilakukan gaya F adalah:

$$W = Fs$$

Karena $s = r \cdot \theta$ dan $\tau = r \cdot F$, maka:

$$W = F \cdot r \cdot \theta$$

$$W = \tau \cdot \theta \quad (6.9)$$

dengan:

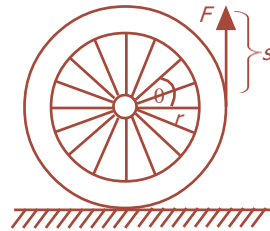
W = usaha (J)

τ = momen gaya (Nm^2)

θ = sudut yang ditempuh

Usaha yang dilakukan oleh momen gaya sama dengan perubahan energi kinetik rotasi:

$$W = \Delta E_{k_{\text{rot}}} = \frac{1}{2} I \cdot \omega_2^2 - I \cdot \omega_1^2 \quad (6.10)$$



Gambar 6.6 Roda berotasi pada sumbu tetap.

Contoh Soal

Sebuah bola pejal dengan massa 10 kg dan jari-jari 20 cm berada pada bidang datar licin. Bola menggelinding dengan kelajuan linier 5 m/s dan kecepatan sudut 6 rad/s. Tentukan energi kinetik total!

Penyelesaian:

Diketahui: $m = 10 \text{ kg}$; $r = 20 \text{ cm}$; $v = 5 \text{ m/s}$; $\omega = 6 \text{ rad/s}$

Ditanya: $Ek = \dots ?$

Jawab:

$$I = \frac{2}{5} m \cdot r^2 = \frac{2}{5} (10)(0,2)^2 = 0,16 \text{ kgm}^2$$

$$Ek = Ek_T + Ek_R = \frac{1}{2} I \cdot \omega^2 + \frac{1}{2} m \cdot v^2$$

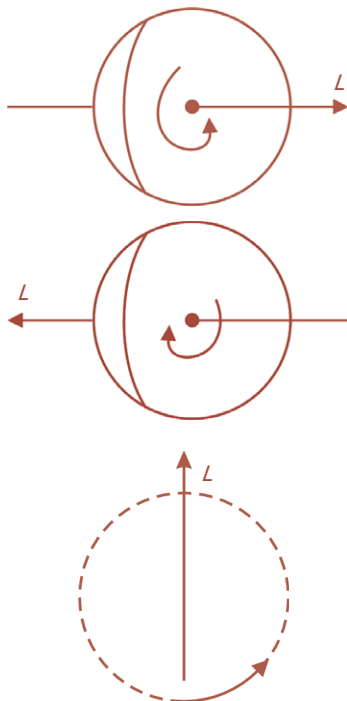
$$= \frac{1}{2} (10)(5)^2 + \frac{1}{2} (0,16)(6)^2 = (125 + 2,88) \text{ J} = 127,88 \text{ J}$$

Uji Kemampuan 6.4

- Sebuah silinder pejal yang bermassa 3 kg dan berjari-jari 50 cm berotasi dengan kecepatan sudut 180 rad/s. Jika kecepatan linier silinder 5 m/s, tentukan energi kinetik total!
- Sebuah bola berongga dengan jari-jari 80 cm berotasi dengan kecepatan sudut 70 rad/s. Jika energi kinetik rotasi bola adalah 5 joule dan kecepatan linier sebesar 7 m/s, tentukan:
 - massa bola,
 - energi kinetik total!



E. Momentum Sudut



Gambar 6.7 Arah momentum sudut.

Pada bab sebelumnya kalian telah mempelajari mengenai momentum yang merupakan hasil kali antara massa dengan kecepatan. Dalam gerak rotasi, besaran yang analog dengan momentum linier adalah momentum sudut. Untuk benda yang berotasi di sekitar sumbu yang tetap, besarnya momentum sudut dinyatakan:

$$L = I \cdot \omega \dots\dots\dots (6.11)$$

dengan:

L = momentum sudut (kgm^2/s)

I = momen inersia (kgm^2)

ω = kecepatan sudut (rad/s)

Momentum sudut merupakan besaran vektor. Arah momentum sudut dari suatu benda yang berotasi dapat ditentukan dengan kaidah putaran sekrup atau dengan aturan tangan kanan (Gambar 6.7). Jika keempat jari menyatakan arah gerak rotasi, maka ibu jari menyatakan arah momentum sudut.

Jika benda bermassa m bergerak rotasi pada jarak r dari sumbu rotasi dengan kecepatan linier v , maka persamaan (6.11) dapat dinyatakan sebagai berikut:

$$L = I \cdot \omega$$

Karena $I = m \cdot r^2$ dan $\omega = \frac{v}{r}$, maka:

$$L = m \cdot r^2 \cdot \frac{v}{r}$$

$$L = m \cdot r \cdot v \dots\dots\dots (6.12)$$

Hubungan momentum sudut dengan momen gaya

Pada bab sebelumnya kalian telah mempelajari bahwa impuls merupakan perubahan momentum dari benda.

$$F \cdot dt = dp$$

$$F = \frac{dp}{dt} = \frac{d(m \cdot v)}{dt}$$

Karena $v = r \cdot \omega$, maka:

$$F = \frac{d(m \cdot r \cdot \omega)}{dt}$$

Jadi, kedua ruas dikalikan dengan r , diperoleh:

$$r \cdot F = \frac{d(m \cdot r^2 \cdot \omega)}{dt}$$

Mengingat $r.F = \tau$ dan $m.r^2 = I$, maka:

$$\tau = \frac{d(I.\omega)}{dt}$$

dengan $I.\omega$ adalah momentum sudut, sehingga:

$$\tau = \frac{dL}{dt} \dots\dots\dots (6.13)$$

Berdasarkan persamaan (6.13) dapat dinyatakan bahwa momen gaya merupakan turunan dari fungsi momentum sudut terhadap waktu.

Hukum Kekekalan Momentum Sudut:

jika tidak ada momen gaya yang bekerja ($\sum \tau = 0$), maka momentum sudut benda yang berotasi adalah tetap.

Secara matematis dirumuskan:

$$\sum \tau = 0$$

$$\frac{dL}{dt} = 0, \text{ maka:}$$

$$L = \text{konstan}$$

$$L_1 = L_2$$

$$I_1.\omega_1 = I_2.\omega_2 \dots\dots\dots (6.14)$$

Komet

Kolom mengingat

Momen gaya (τ) = $r.F$
Momen inersia (I) = $m.r^2$
Momentum sudut = $I.\omega$
Energi kinetik total (EK)
 $= \frac{1}{2}I\omega^2 + \frac{1}{2}mv^2$

Tabel 6.2 Analogi besaran-besaran pada gerak translasi dan rotasi

Gerak Translasi	Gerak Rotasi	Hubungan
perpindahan linier s	perpindahan sudut θ	$\theta = \frac{s}{r}$
kecepatan linier v	kecepatan sudut ω	$\omega = \frac{v}{r}$
percepatan linier a	percepatan sudut α	$\alpha = \frac{a}{r}$
massa m	momen inersia I	$I = m.r^2$
gaya F $F = m.a$	momen gaya τ $\tau = I.\alpha$	$\tau = r.F$
momentum linier p	momen sudut L	$L = r.p = r.m.v$
energi kinetik $EK = \frac{1}{2} m.v^2$	$EK = \frac{1}{2} I.\omega^2$	
usaha $W = F.s$	$W = \tau.\theta$	
daya $P = F.v$	$P = \tau.\omega$	

Contoh Soal

Sebuah silinder tipis berongga dengan diameter 120 cm dan massa 20 kg berotasi melalui pusat sumbunya seperti gambar berikut ini.



Jika kecepatan sudutnya 20 rpm, hitunglah momentum sudutnya!

Penyelesaian:

Diketahui: $d = 120 \text{ cm} \rightarrow R = 60 \text{ cm} = 0,6 \text{ m}$

$m = 20 \text{ kg}$

$\omega = 20 \text{ rpm}$

Ditanya: $L = \dots ?$

Jawab:

$$\omega = 20 \text{ rpm} = \frac{20 \text{ rpm}}{60 \text{ s}} = \frac{1}{3} \text{ rps}$$

$$= \frac{2\pi}{3} \text{ rad/s} = 120 \text{ rad/s}$$

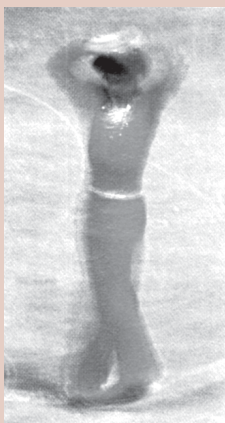
$$I = m.R^2 = (20)(0,6)^2 = 7,2 \text{ kgm}^2$$

$$L = I.\omega = (7,2)(120) = 864 \text{ kgm}^2/\text{s}$$

Uji Kemampuan 6.5

Dua cakram dipasang pada suatu poros putar yang sama. Cakram A memiliki momen inersia 3 kgm^2 dan kecepatan sudut 360 rad/s . Cakram B memiliki momen inersia 4 kgm^2 dan kecepatan sudut 320 rad/s , dengan arah putaran sama dengan cakram A. Hitunglah kecepatan sudutnya setelah digabung!

Percikan Fisika



Pemain Skat Berputar

Seperti halnya benda yang sedang bergerak, benda yang sedang berputar memiliki momentum. Benda yang berputar memiliki momentum sudut, momentum ini bertambah besar dengan bertambahnya kecepatan dan massa. Momentum sudut tersimpan, tidak berubah kecuali jika ada gaya yang bekerja terhadap benda yang bersangkutan. Salah satu efek dari konservasi momentum adalah perubahan bentuk benda yang berputar akan mengubah kecepatan putarnya. Alasan inilah pemain skat menarik kedua lengannya menempel pada tubuh untuk meningkatkan kecepatan putarnya, karena garis tengah tubuh berkurang.



Kesetimbangan Benda

1. Kesetimbangan Partikel

Penyebab gerak sumbu benda adalah gaya, dimana semakin besar gaya, maka semakin besar pula percepatan yang dialami. Partikel adalah benda yang ukurannya dapat diabaikan sehingga dapat digambarkan sebagai suatu titik materi. Akibatnya, jika gaya bekerja pada partikel titik tangkap gaya berada tepat pada partikel-partikel tersebut. Oleh karena itu, partikel hanya mengalami gerak translasi dan tidak mengalami gerak rotasi.

Suatu partikel dikatakan dalam keadaan setimbang apabila resultan gaya yang bekerja pada partikel sama dengan nol.

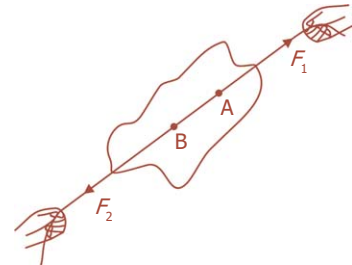
$$\sum F = 0 \quad (6.15)$$

Apabila partikel pada bidang xy , maka syarat kesetimbangan adalah resultan gaya pada komponen sumbu x dan sumbu y sama dengan nol.

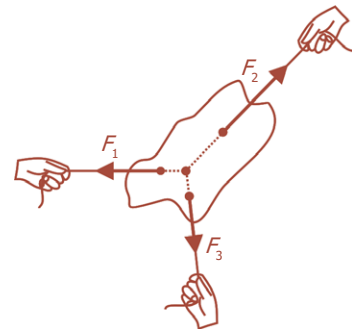
$$\sum F_x = 0$$

$$\sum F_y = 0 \quad (6.16)$$

Berdasarkan Hukum I Newton, jika resultan gaya yang bekerja pada benda sama dengan nol, maka percepatan benda menjadi nol. Artinya, bahwa partikel dalam keadaan diam atau bergerak dengan kecepatan tetap. Apabila partikel dalam keadaan diam disebut mengalami kesetimbangan statis, sedangkan jika bergerak dengan kecepatan tetap disebut kesetimbangan dinamis.



Gambar 6.8 Resultan gaya sama dengan nol jika gaya sama besar, berlawanan arah dan garis kerjanya sama.



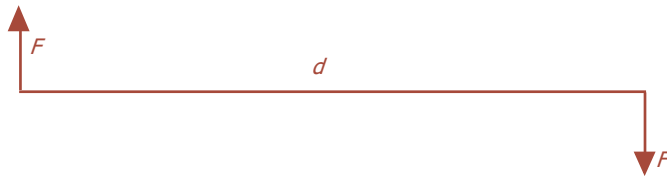
Gambar 6.9 Resultan gaya sama dengan nol sehingga benda diam.

2. Kesetimbangan Benda Tegar

Benda tegar adalah benda yang apabila dipengaruhi gaya-gaya tidak mengalami perubahan bentuk. Meskipun benda berotasi namun bentuknya tetap sehingga jarak antara partikel-partikelnya tetap.

a. Momen Kopel

Kopel adalah pasangan dua buah gaya yang sejajar, sama besar, dan arahnya berlawanan. Pengaruh kopel terhadap sebuah benda adalah memungkinkan benda berotasi. Besarnya kopel dinyatakan dengan momen kopel yang merupakan hasil kali antara gaya dengan jarak antara kedua gaya tersebut.



Secara matematis dituliskan:

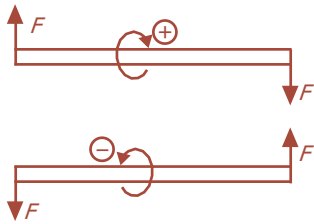
$$M = F \cdot d \quad (6.17)$$

dengan:

M = momen kopel (Nm)

F = gaya (N)

d = jarak antara gaya (m)



Gambar 6.10 Momen gaya positif dan negatif.

Momen kopel merupakan besaran vektor. Momen kopel bertanda positif jika arah putarannya searah dengan putaran jarum jam dan negatif jika berlawanan dengan arah putaran jarum jam. Perhatikan Gambar 6.10 di samping.

b. Menentukan Titik Tangkap Gaya Resultan

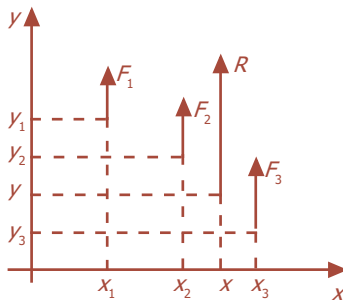
Pada bidang datar xy terdapat beberapa gaya F_1 , F_2 , dan F_3 saling sejajar dan bertitik tangkap di (x_1, y_1) , (x_2, y_2) , (x_3, y_3) seperti Gambar 6.11.

Resultan ketiga gaya tersebut adalah R yang bertitik tangkap di (x, y) . Jika komponen gaya yang searah sumbu x adalah F_{1x} , F_{2x} , dan F_{3x} , sedangkan komponen gaya pada arah sumbu y adalah F_{1y} , F_{2y} , dan F_{3y} dengan jarak x_1 , x_2 , dan x_3 terhadap sumbu y , maka berlaku:

$$\begin{aligned} \sum \tau_y &= \tau_{1y} + \tau_{2y} + \tau_{3y} \\ R_y x_R &= F_{1y} \cdot x_1 + F_{2y} \cdot x_2 + F_{3y} \cdot x_3 \\ x_R &= \frac{F_{1y} \cdot x_1 + F_{2y} \cdot x_2 + F_{3y} \cdot x_3}{R_y} \\ &= \frac{F_{1y} \cdot x_1 + F_{2y} \cdot x_2 + F_{3y} \cdot x_3}{F_{1y} + F_{2y} + F_{3y}} \\ x_R &= \frac{\sum F_{ny} \cdot x_n}{R_y} \quad (6.18) \end{aligned}$$

Dengan cara yang sama diperoleh:

$$\begin{aligned} y_R &= \frac{\sum F_{nx} \cdot y_n}{\sum R_x} \\ &= \frac{F_{1x} \cdot y_1 + F_{2x} \cdot y_2 + F_{3x} \cdot y_3}{F_{1x} + F_{2x} + F_{3x}} \quad (6.19) \end{aligned}$$



Gambar 6.11 Sejumlah gaya bekerja pada bidang xy .

c. Syarat Kesetimbangan Benda

Pada umumnya benda yang sedang bergerak mengalami gerak translasi dan rotasi. Suatu benda dikatakan setimbang apabila benda memiliki kesetimbangan translasi dan kesetimbangan rotasi. Dengan demikian, syarat kesetimbangan benda adalah resultan gaya dan momen gaya terhadap suatu titik sembarang sama dengan nol. Secara matematis dapat dituliskan:

$$\sum F_x = 0, \sum F_y = 0, \text{ dan } \sum \tau = 0 \dots\dots\dots (6.20)$$

Contoh Soal

1. Jika massa benda 2 kg dan sistem dalam keadaan setimbang, tentukan besar tegangan tali T_1 dan T_2 ! ($g = 10 \text{ m/s}^2$)

Penyelesaian:

Diketahui: $m = 2 \text{ kg}$
 $g = 10 \text{ m/s}^2$
 $\alpha_1 = 30^\circ$
 $\alpha_2 = 60^\circ$

Ditanya: $T_1 = \dots ?$
 $T_2 = \dots ?$

Jawab:

$$T_{1x} = T_1 \cos \alpha_1$$

$$= T_1 \cos 30^\circ = \frac{1}{2} \sqrt{3} T_1$$

$$T_{1y} = T_1 \sin 30^\circ = \frac{1}{2} T_1$$

$$T_{2x} = T_2 \cos 60^\circ = \frac{1}{2} T_2$$

$$T_{2y} = T_2 \sin 60^\circ = \frac{1}{2} \sqrt{3} T_2$$

$$w = m \cdot g = (2 \text{ kg})(10 \text{ m/s}^2) = 20 \text{ N}$$

Pada sumbu x

$$\sum F_x = 0$$

$$T_{2x} - T_{1x} = 0$$

$$\frac{1}{2} T_2 - \frac{1}{2} \sqrt{3} T_1 = 0$$

$$\frac{1}{2} T_2 = \frac{1}{2} \sqrt{3} T_1$$

$$T_2 = \sqrt{3} T_1 \dots (i)$$

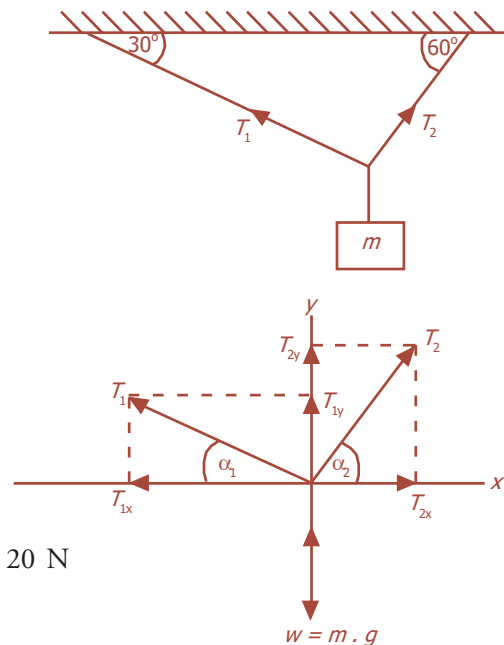
Pada sumbu y

$$\sum F_y = 0$$

$$T_{1y} + T_{2y} - w = 0$$

$$T_{1y} + T_{2y} = w$$

$$\frac{1}{2} T_1 + \frac{1}{2} \sqrt{3} T_2 = 20 \dots (ii)$$



Dari persamaan (i), $T_2 = \sqrt{3} T_1$ maka:

$$\frac{1}{2} T_1 + \frac{1}{2} \sqrt{3} \cdot \sqrt{3} T_1 = 20$$

$$\frac{1}{2} T_1 + \frac{3}{2} T_1 = 20$$

$$2 T_1 = 20$$

$$T_1 = 10 \text{ N}$$

Karena $T_2 = \sqrt{3} T_1$, maka: $T_2 = 10\sqrt{3} \text{ N}$

2. Jika $AB = BD = 2 \text{ m}$ dan $DC = 1 \text{ m}$.
Tentukan momen gaya di titik A dan C!

Penyelesaian:

Diketahui: $F_1 = 40 \text{ N}$ $AB = BD = 2 \text{ m}$

$F_2 = 50 \text{ N}$ $CD = 1 \text{ m}$

$F_3 = 30 \text{ N}$ $AD = 4 \text{ m}$

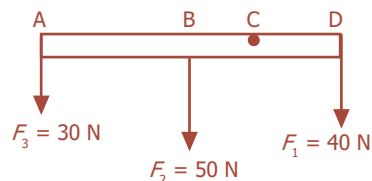
Ditanya: $\tau_A = \dots ?$

$\tau_C = \dots ?$

Jawab:

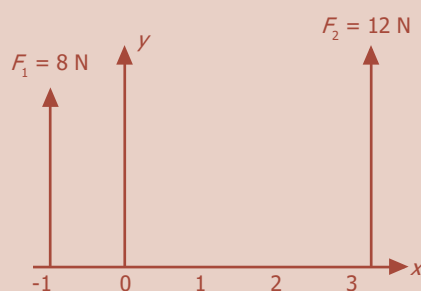
$$\begin{aligned} \tau_A &= \tau_A + \tau_B + \tau_D \\ &= F_3 \cdot 0 + F_2 (AB) + F_1 (AD) \\ &= (50 \times 2) + (40 \times 4) \\ &= 260 \text{ Nm} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \tau_C &= -\tau_A + \tau_B + \tau_D \\ &= -F_3 \cdot AC - F_2 \cdot BC + F_1 \cdot CD \\ &= -(30 \times 3) - (50 \times 1) + (40 \times 1) \\ &= -100 \text{ Nm} \end{aligned}$$



Uji Kemampuan 6.6

1.

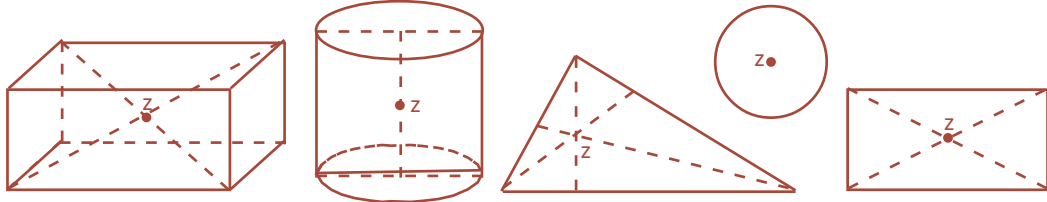


Berdasarkan gambar di samping, tentukan besar dan titik tangkap gaya resultan dari kedua gaya yang sejajar F_1 dan F_2 !

2. Batang AB dengan panjang 10 m dan massa 5 kg disandarkan pada dinding vertikal, A pada dinding dan B pada lantai. Jika A terletak 8 m di atas lantai dan dinding licin, tentukan koefisien gesek lantai dengan ujung B agar batang setimbang! ($g = 10 \text{ m/s}^2$).

3. Titik Berat

Setiap benda terdiri atas titik-titik materi atau partikel yang masing-masing memiliki berat. Resultan dari seluruh berat partikel disebut gaya berat benda. Titik tangkap gaya berat merupakan titik berat benda.



Gambar 6.12 Titik berat benda pada benda homogen yang bentuknya teratur.

Menentukan Titik Berat Benda

Untuk benda-benda homogen yang memiliki bentuk teratur, sehingga memiliki garis atau bidang simetris, maka titik berat benda terletak pada garis atau bidang simetri tersebut. Sementara itu, untuk benda-benda yang tidak teratur, titik beratnya dapat ditentukan dengan cara berikut ini.

Pada Gambar 6.13(a), benda digantung dengan tali di titik A dengan ℓ_1 sebagai perpanjangannya. Kemudian benda digantung pada bagian lain titik B dengan ℓ_1 dan ℓ_2 berpotongan di suatu titik. Itulah yang merupakan titik berat benda (z).

Secara kuantitatif letak titik berat benda dapat ditentukan melalui perhitungan sebagai berikut ini.

Misalnya, sebuah benda tegar dengan bentuk tidak teratur berada pada bidang xy seperti Gambar 6.14.

Jika berat masing-masing partikel penyusun benda adalah $w_1, w_2, w_3 \dots w_n$ dengan koordinat $(x_1, y_1), (x_2, y_2), (x_3, y_3), \dots (x_n, y_n)$, dan koordinat titik berat benda (x_0, y_0) , maka momen gaya berat benda terhadap sumbu y adalah:

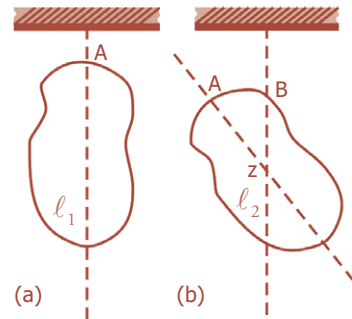
$$x_0 \cdot w = w_1 \cdot x_1 + w_2 \cdot x_2 + w_3 \cdot x_3 + \dots + w_n \cdot x_n$$

$$x_0 = \frac{w_1 \cdot x_1 + w_2 \cdot x_2 + w_3 \cdot x_3 + \dots + w_n \cdot x_n}{w}$$

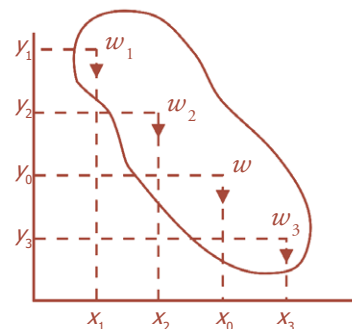
$$x_0 = \frac{w_1 \cdot x_1 + w_2 \cdot x_2 + w_3 \cdot x_3 + \dots + w_n \cdot x_n}{w_1 + w_2 + w_3 + \dots + w_n}$$

Jika percepatan gravitasi yang dialami oleh setiap partikel dianggap sama, maka:

$$x_0 = \frac{(m_1 \cdot g)x_1 + (m_2 \cdot g)x_2 + (m_3 \cdot g)x_3 + \dots + (m_n \cdot g)x_n}{m_1 \cdot g + m_2 \cdot g + m_3 \cdot g + \dots + m_n \cdot g}$$



Gambar 6.13 Menentukan titik berat bidang yang tidak teratur.



Gambar 6.14 Gaya berat partikel.

Komet
Kolom mengingat

Titik berat benda sebenarnya tidak sama dengan pusat massa karena nilai g tergantung letak benda dalam medan gravitasi. Akan tetapi, karena benda kecil, maka koordinat titik pusat massa sama dengan koordinat titik berat benda.

$$x_0 = \frac{m_1 \cdot x_1 + m_2 \cdot x_2 + m_3 \cdot x_3 + \dots + m_n \cdot x_n}{m_1 + m_2 + m_3 + \dots + m_n}$$

$$x_0 = \frac{\sum m_n \cdot x_n}{\sum m_n} \dots\dots\dots (6.21)$$

Dengan cara yang sama koordinat titik berat benda pada sumbu y dapat dinyatakan:

$$y_0 = \frac{m_1 \cdot y_1 + m_2 \cdot y_2 + m_3 \cdot y_3 + \dots + m_n \cdot y_n}{m_1 + m_2 + m_3 + \dots + m_n}$$

$$y_0 = \frac{\sum m_n \cdot y_n}{\sum m_n} \dots\dots\dots (6.22)$$

Untuk benda-benda homogen, berat atau massa benda dapat dinyatakan dalam volume, luas, dan panjangnya.

a) Benda homogen berbentuk ruang

$$x_0 = \frac{\sum m_n \cdot x_n}{\sum m_n}, \text{ karena } m = \rho \cdot V$$

Maka:

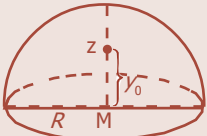
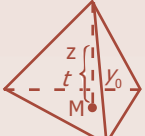

$$x_0 = \frac{\sum \rho \cdot V_n \cdot x_n}{\sum \rho \cdot V_n}$$

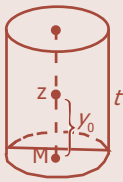
$$x_0 = \frac{V_1 \cdot x_1 + V_2 \cdot x_2 + V_3 \cdot x_3 + \dots + V_n \cdot x_n}{V_1 + V_2 + V_3 + \dots + V_n}$$

$$y_0 = \frac{\sum V_n \cdot y_n}{\sum V_n}$$

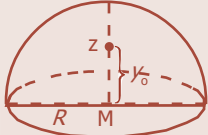
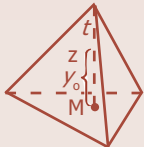

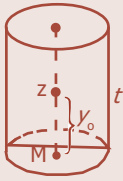
$$y_0 = \frac{V_1 \cdot y_1 + V_2 \cdot y_2 + V_3 \cdot y_3 + \dots + V_n \cdot y_n}{V_1 + V_2 + V_3 + \dots + V_n}$$

Tabel 6.3 Titik berat benda homogen berupa selimut ruang

No.	Gambar	Nama	Letak Titik Berat	Keterangan
1.		selimut setengah bola dengan jari-jari R	$y_0 = \frac{1}{2} R$	R = jari-jari
2.		selimut limas dengan tinggi t	$y_0 = \frac{1}{3} t$	t = tinggi limas
3.		selimut kerucut dengan tinggi t	$y_0 = \frac{1}{3} t$	t = tinggi kerucut

4.		kulit silinder tanpa tutup dengan tinggi t	$y_0 = \frac{1}{2} t$	$t =$ tinggi silinder
----	---	--	-----------------------	-----------------------

Tabel 6.4 Titik berat benda pejal homogen berbentuk ruang

No.	Gambar	Nama	Letak Titik Berat	Keterangan
1.		setengah bola dengan jari-jari R	$y_0 = \frac{3}{8} R$	$R =$ jari-jari
2.		limas dengan tinggi t	$y_0 = \frac{1}{4} t$	$t =$ tinggi limas
3.		kerucut dengan tinggi t	$y_0 = \frac{1}{4} t$	$t =$ tinggi kerucut
4.		silinder pejal dengan tinggi t	$y_0 = \frac{1}{2} t$	$t =$ tinggi silinder

- b) Benda homogen berbentuk bidang
 Karena besarnya volume: $V = A \cdot t$, maka:



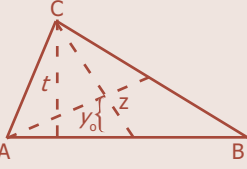
$$x_0 = \frac{\sum A_n \cdot x_n}{\sum A_n}$$

$$x_0 = \frac{A_1 \cdot x_1 + A_2 \cdot x_2 + A_3 \cdot x_3 + \dots + A_n \cdot x_n}{A_1 + A_2 + A_3 + \dots + A_n}$$

$$y_0 = \frac{\sum A_n \cdot y_n}{\sum A_n}$$

$$y_0 = \frac{A_1 \cdot y_1 + A_2 \cdot y_2 + A_3 \cdot y_3 + \dots + A_n \cdot y_n}{A_1 + A_2 + A_3 + \dots + A_n}$$

Tabel 6.5 Titik berat benda homogen berbentuk bidang

No.	Gambar	Nama	Letak Titik Berat	Keterangan
1.		juring lingkaran dengan jari-jari R	$y_0 = \frac{\overline{AB}}{AB} \cdot \frac{2}{3} R$	\overline{AB} = tali busur AB AB = busur AB R = jari-jari
2.		setengah lingkaran dengan jari-jari R	$y_0 = \frac{4R}{3\pi}$	R = jari-jari
3.		segitiga dengan tinggi t	$y_0 = \frac{1}{2} t$	t = tinggi segitiga

c) Benda homogen berbentuk garis

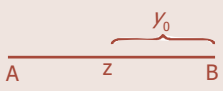
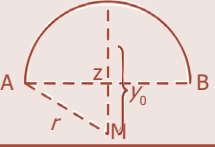

$$x_0 = \frac{\sum \ell_n \cdot x_n}{\sum \ell_n}$$

$$x_0 = \frac{\ell_1 \cdot x_1 + \ell_2 \cdot x_2 + \ell_3 \cdot x_3 + \dots + \ell_n \cdot x_n}{\ell_1 + \ell_2 + \ell_3 + \dots + \ell_n}$$

$$y_0 = \frac{\sum \ell_n \cdot y_n}{\sum \ell_n}$$

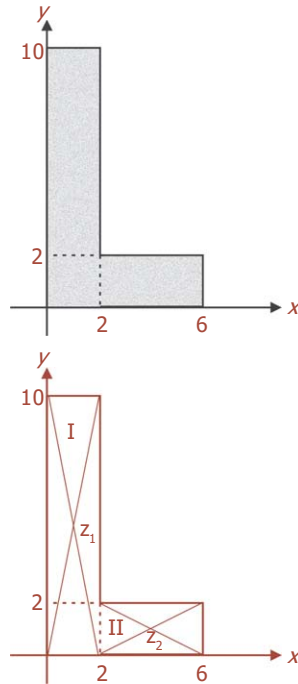
$$y_0 = \frac{\ell_1 \cdot y_1 + \ell_2 \cdot y_2 + \ell_3 \cdot y_3 + \dots + \ell_n \cdot y_n}{\ell_1 + \ell_2 + \ell_3 + \dots + \ell_n}$$

Tabel 6.6 Titik berat benda homogen berbentuk garis

No.	Gambar	Nama	Letak Titik Berat	Keterangan
1.		garis lurus	$y_0 = \frac{1}{2} AB$	z di tengah-tengah AB
2.		busur lingkaran	$y_0 = \frac{\overline{AB}}{AB} R$	\overline{AB} = tali busur AB AB = busur AB R = jari-jari
3.		busur setengah lingkaran	$y_0 = \frac{2R}{\pi}$	R = jari-jari

Contoh Soal

1.



Suatu bidang datar homogen bentuk dan ukurannya seperti pada gambar. Tentukan koordinat titik berat bidang tersebut!

Penyelesaian:

Bidang dibagi menjadi 2 bagian berbentuk empat persegi panjang I dan II dengan titik berat z_1 dan z_2 .

Titik berat benda di titik perpotongan diagonal-diagonalnya.

$$z_1 = (x_1, y_1) = (1, 5)$$

$$z_2 = (x_2, y_2) = (4, 1)$$

$$A_1 = 2 \times 10 = 20$$

$$A_2 = 4 \times 2 = 8$$

$$x_0 = \frac{\sum A_n \cdot x_n}{\sum A_n}$$

$$= \frac{A_1 \cdot x_1 + A_2 \cdot x_2}{A_1 + A_2}$$

$$= \frac{(20)(1) + (8)(4)}{20 + 8}$$

$$= \frac{52}{28}$$

$$= 1\frac{6}{7}$$

$$y_0 = \frac{\sum A_n \cdot y_n}{\sum A_n}$$

$$= \frac{A_1 \cdot y_1 + A_2 \cdot y_2}{A_1 + A_2}$$

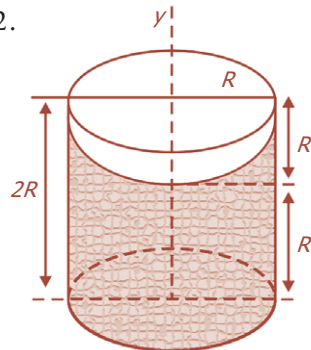
$$= \frac{(20)(5) + (8)(1)}{20 + 8}$$

$$= \frac{108}{28}$$

$$= 3\frac{6}{7}$$

Jadi, titik berat bidang adalah $z(1\frac{6}{7}, 3\frac{6}{7})$.

2.



Gambar di samping menunjukkan sebuah silinder berjari-jari R dan tinggi $2R$. Bagian atas dilubangi berbentuk setengah bola. Tentukan koordinat titik berat silinder tersebut!

Penyelesaian:

Benda I (silinder)

$$V_1 = 2\pi R^3$$

$$y_1 = R$$

Benda II (setengah bola)

$$V_2 = -\frac{2}{3}\pi R^3$$

$$y_2 = 2R - y$$

$$= 2R - \frac{3}{8}R$$

$$= \frac{13}{8}R$$

$$y_0 = \frac{V_1 \cdot y_1 + V_2 \cdot y_2}{V_1 + V_2}$$

$$y_0 = \frac{(2\pi R^3) \cdot R + (-\frac{2}{3}\pi R^3)(\frac{13}{8}R)}{2\pi R^3 + (-\frac{2}{3}\pi R^3)} = \frac{2\pi R^4 - \frac{26}{24}\pi R^4}{2\pi R^3 - \frac{2}{3}\pi R^3} = \frac{11}{16}R$$

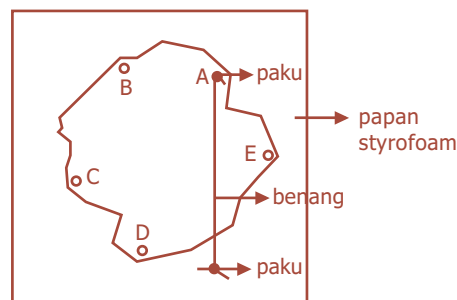
Koordinat titik berat silinder berlubang adalah $(0, \frac{11}{16}R)$

Kegiatan

Tujuan : Menentukan titik berat benda tidak teratur.
 Alat dan bahan : Karton, gunting, benang, paku, styrofoam, kertas.

Cara Kerja:

1. Potonglah karton dengan bentuk tidak teratur.
2. Buatlah beberapa lubang pada pinggir potongan karton, dan berilah nama, misalnya A, B, C, dan seterusnya.
3. Gantungkan potongan karton pada papan styrofoam dengan memasukkan paku pada lubang A.
4. Gantungkan benang yang telah diberi paku (beban), pada paku lubang A.

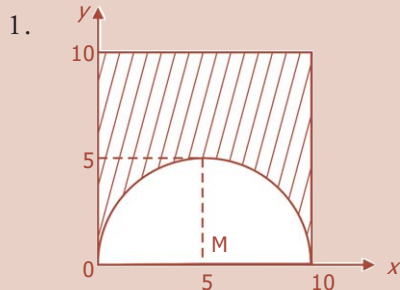


5. Jika benang sudah setimbang (tenang, diam, tidak bergerak), buatlah garis yang berimpit dengan benang tersebut.
6. Ulangi langkah 3 - 5 untuk lubang B, C, D, dan seterusnya.
7. Dari garis-garis yang kalian buat akan ditemukan satu titik yang merupakan perpotongan dari garis-garis tersebut. Berilah nama titik z (titik berat).

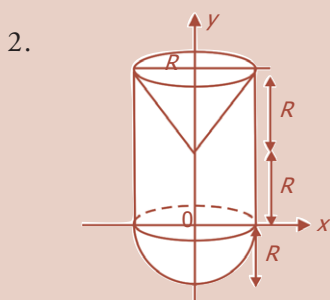
Diskusi:

1. Apakah yang dimaksud titik berat?
2. Bagaimanakah jumlah momen gaya terhadap titik z dan resultan gayanya ketika benda dalam keadaan setimbang?
3. Setelah ketemu titik beratnya, letakkan potongan karton pada kertas dan tentukan koordinat titik z tersebut!

Uji Kemampuan 6.7



Suatu pelat homogen mula-mula berukuran 10×10 , kemudian bagian bawah dipotong setengah lingkaran yang berpusat di M. Tentukan koordinat titik beratnya!



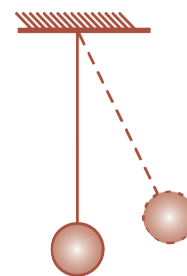
Gambar di samping menunjukkan sebuah silinder dengan jari-jari R dan tinggi $2R$. Bagian atas dilubangi berbentuk kerucut dan bagian bawah ditambah berbentuk setengah bola. Jika $R = 10$ cm, tentukanlah koordinat titik berat silinder tersebut!

4. Jenis-Jenis Kestimbangan

Telah diketahui sebelumnya bahwa benda dapat mengalami kestimbangan dinamis dan kestimbangan statis. Kestimbangan dinamis dikelompokkan menjadi dua, yaitu kestimbangan translasi dan kestimbangan rotasi. Kestimbangan translasi terjadi apabila benda bergerak dengan percepatan linier nol ($a = 0$), sedangkan kestimbangan rotasi terjadi apabila benda bergerak dengan kecepatan sudut tetap atau percepatan sudut nol ($\alpha = 0$).

Kestimbangan statis benda dibedakan menjadi tiga jenis, yaitu kestimbangan stabil, kestimbangan labil, dan kestimbangan netral.

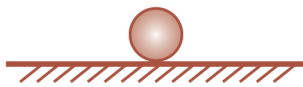
- Kestimbangan stabil** atau mantap adalah kestimbangan yang terjadi pada benda yang apabila dipengaruhi gaya akan kembali ke posisi semula, begitu gaya dihilangkan. Gambar 6.15 menunjukkan sebuah bola yang tergantung bebas pada sebuah tali. Jika bola digerakkan atau diberi gaya kemudian dihilangkan, maka bola akan segera kembali ke posisi semula. Kestimbangan stabil ditandai dengan naiknya kedudukan titik berat benda jika dipengaruhi gaya.



Gambar 6.15 Kestimbangan stabil suatu benda.



Gambar 6.16 Kestimbangan labil suatu benda.



Gambar 6.17 Kestimbangan netral benda.

- b. **Kestimbangan labil** adalah kestimbangan yang terjadi pada benda yang apabila dipengaruhi gaya tidak kembali ke posisi semula. Gambar 6.16 menunjukkan sebuah bola yang tergantung di atas tongkat. Jika bola digerakkan atau diberi gaya kemudian dihilangkan, maka bola tidak akan kembali ke posisi semula. Kestimbangan labil ditandai dengan turunya kedudukan titik berat benda jika dipengaruhi gaya.
- c. **Kestimbangan netral atau indeferen** adalah kestimbangan yang terjadi pada benda yang apabila dipengaruhi gaya akan mengalami perubahan posisi, tetapi tidak mengalami perubahan titik berat. Gambar 6.17 menunjukkan sebuah bola yang berada pada lantai mendatar. Jika bola diberi gaya kemudian dihilangkan, maka bola akan bergerak dan diam pada posisi yang berbeda. Kestimbangan netral ditandai dengan tidak adanya perubahan (naik atau turunya) kedudukan titik berat benda.

Fiesta

Fisikawan Kita



Leon Foucault (1819 - 1868)

Foucault menggunakan pendulum untuk memperlihatkan putaran Bumi. Pada tahun 1851 ia menggantungkan bola besi yang sangat besar dengan tali baja pada tengah-tengah kubah di Paris. Ketika pertama kali dilepaskan, pendulum berayun melalui garis yang diberi tanda di lantai. Namun selang beberapa jam kemudian, pendulum itu ternyata telah berubah arah. Yang sebenarnya adalah pendulum Foucault itu tetap berayun dengan arah yang sama; Bumi di pendulum itulah yang telah berputar.

Kilas Balik

- * Momen gaya atau torsi didefinisikan sebagai hasil kali gaya dengan jarak titik ke garis kerja gaya.

$$\tau = F \cdot d = r \times F = Fr \sin \alpha$$
- * Momen inersia sebuah partikel yang berotasi terhadap sumbu tertentu dengan jari-jari r adalah $I = m \cdot r^2$.

Untuk benda tegar yang massanya terdistribusi kontinu, momen inersia dihitung dengan metode integral:

$$I = \int r^2 dm$$

- ✱ Momen gaya adalah penyebab gerak rotasi. Hubungan antara momen gaya dengan percepatan sudut adalah:

$$\tau = I \cdot \alpha$$

- ✱ Energi kinetik rotasi adalah energi yang dimiliki oleh benda yang melakukan gerak rotasi.

$$Ek_R = \frac{1}{2} I \cdot \omega^2$$

Untuk benda yang mengalami gerak rotasi dan translasi (menggelinding), besarnya energi kinetik benda adalah:

$$Ek = Ek_R + Ek_T$$

$$Ek = \frac{1}{2} I \cdot \omega^2 + \frac{1}{2} m \cdot v^2$$

- ✱ Usaha yang dilakukan oleh benda yang berotasi adalah:

$$W = \tau \cdot \theta$$

Usaha juga merupakan perubahan energi kinetik rotasi:

$$W = \frac{1}{2} I \cdot \omega_2^2 - \frac{1}{2} I \cdot \omega_1^2$$

- ✱ Momentum sudut sistem partikel dengan kecepatan sudut ω adalah:

$$L = I \cdot \omega$$

Jika benda berotasi bergerak dengan kecepatan linier v , maka momentum sudutnya:

$$L = m \cdot r \cdot v$$

- ✱ Hukum Kekekalan Momentum Sudut

Jika tidak ada momen gaya yang bekerja ($\sum \tau = 0$) maka momentum sudut suatu benda (sistem) yang berotasi adalah tetap.

$$L = \text{konstan}$$

$$L_1 = L_2 \rightarrow I_1 \cdot \omega_1 = I_2 \cdot \omega_2$$

- ✱ Suatu benda tegar berada dalam kesetimbangan apabila memenuhi syarat berikut ini.

$$\sum F_x = 0, \sum F_y = 0, \text{ dan } \sum \tau = 0$$

- ✱ Kopel adalah pasangan dua buah gaya yang sejajar, sama besar, dan arahnya berlawanan. Besarnya momen kopel dirumuskan: $M = F \cdot d$.

- ✱ Titik tangkap gaya resultan beberapa gaya sejajar yang berada pada bidang xy dapat ditentukan dengan persamaan:

$$x_R = \frac{\sum F_{ny} \cdot x_n}{\sum R_y}$$

$$y_R = \frac{\sum F_{nx} \cdot y_n}{\sum R_x}$$

- ✱ Koordinat titik berat benda yang bentuknya tidak teratur dapat ditentukan sebagai berikut:

$$x_0 = \frac{\sum w_n \cdot x_n}{\sum w_n}$$

$$y_0 = \frac{\sum w_n \cdot y_n}{\sum w_n}$$

Jika percepatan gravitasi dianggap sama, maka:

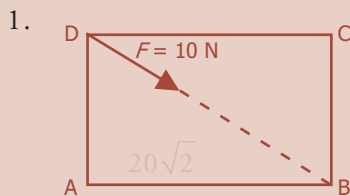
$$x_0 = \frac{\sum m_n \cdot x_n}{\sum m_n}$$

$$y_0 = \frac{\sum m_n \cdot y_n}{\sum m_n}$$

- ✱ Kestimbangan statis benda dikelompokkan menjadi tiga jenis, yaitu kestimbangan stabil, kestimbangan labil, dan kestimbangan netral atau indeferen.

Uji Kompetensi

A. Pilihlah jawaban yang paling tepat!



Sebuah bujur sangkar ABCD dengan panjang rusuk $20\sqrt{2}$ cm bekerja gaya F seperti pada gambar. Besarnya momen gaya F pada titik A adalah

- 2 Nm
 - $2\sqrt{2}$ Nm
 - 4 Nm
 - $20\sqrt{2}$ Nm
 - 200 Nm
2. Apabila dimensi massa, panjang, dan waktu berturut-turut adalah M, L, dan T, maka dimensi dari momen gaya adalah
- $ML^{-2}T^{-2}$
 - $ML^{-1}T^{-2}$
 - MLT^{-2}
 - MT^2T^{-2}
 - ML^2T^2

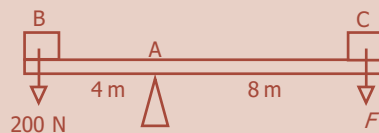
3. Sebuah batang homogen panjang 80 cm dan massanya 1,5 kg. Batang diputar dengan poros terletak pada jarak 20 cm dari salah satu ujungnya. Besar momentum inersia batang itu adalah

a. $0,15 \text{ kgm}^2$
 b. $0,42 \text{ kgm}^2$
 c. $4,8 \text{ kgm}^2$
 d. $7,2 \text{ kgm}^2$
 e. $10,5 \text{ kgm}^2$

4. Sebuah silinder pejal yang massanya 10 kg dan jari-jari 20 cm menggelinding dengan kecepatan 8 m/s. Energi kinetik silinder itu adalah

a. 320 J
 b. 480 J
 c. 1.380 J
 d. 1.600 J
 e. 1.920 J

5.

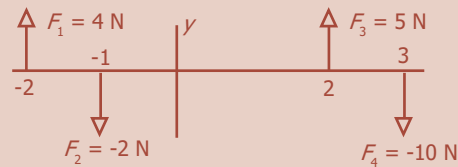


Suatu sistem dirangkai seperti gambar di samping. Jika sistem dalam keadaan setimbang, maka besarnya gaya F adalah

a. 50 N
 b. 80 N
 c. 100 N

d. 120 N
 e. 180 N

6.

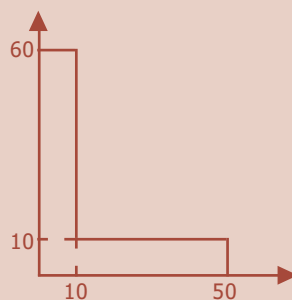


Resultan gaya yang sejajar seperti terlihat pada gambar, terletak pada ...

a. $x = -3$
 b. $x = 0$
 c. $x = 1$

d. $x = 4$
 e. $x = 8,7$

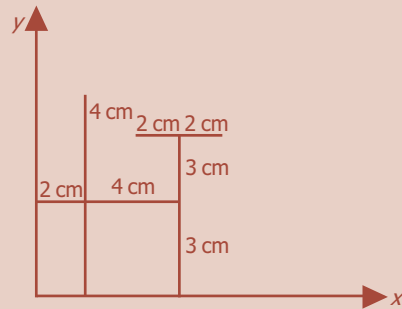
7.



Koordinat titik berat pada benda homogen seperti gambar di samping adalah

a. (10, 15)
 b. (10, 20)
 c. (15, 20)
 d. (20, 15)
 e. (20, 20)

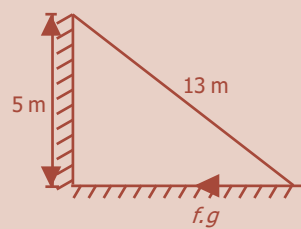
8.



Koordinat titik berat empat buah kawat yang dirangkai seperti gambar di samping adalah

- a. $(4\frac{3}{10}, 4)$
- b. $(4\frac{1}{2}, 4\frac{3}{10})$
- c. $(6\frac{3}{10}, 6\frac{1}{2})$
- d. $(6\frac{1}{2}, 6\frac{3}{10})$
- e. $(6, 4)$

9.

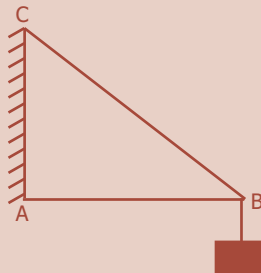


Sebuah batang homogen yang massanya 13 kg ($g = 10 \text{ m/s}^2$) dan panjang 13 m disandarkan pada sebuah tembok tingginya 5 meter dari tanah. Jika tembok licin, lantai kasar, dan batang dalam kesetimbangan, maka koefisien gesekan antara lantai dengan ujung batang adalah

- a. 1,45
- b. 1,2
- c. 0,9

- d. 0,75
- e. 0,4

10.

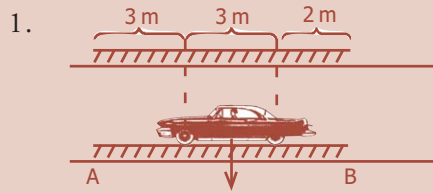


Pada sistem kesetimbangan benda seperti pada gambar di samping, panjang AB = 80 cm, AC = 60 cm, dan berat 18 N. Jika ujung batang digantungkan beban 30 N, maka tegangan pada tali adalah ...

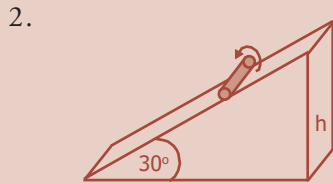
- a. 36 N
- b. 48 N
- c. 50 N

- d. 65 N
- e. 80 N

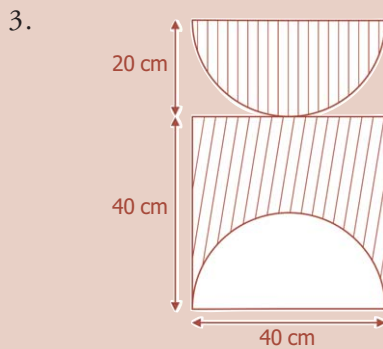
B. Jawablah dengan singkat dan benar!



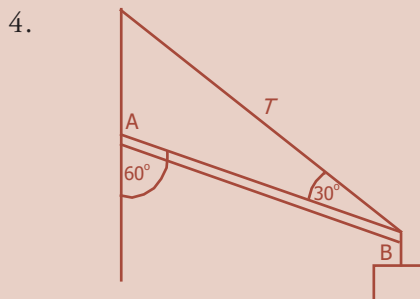
Sebuah mobil melewati jembatan dengan panjang 8 m seperti ditunjukkan gambar di samping. Jika gaya roda depan 400 N dan gaya roda belakang 500 N, berapakah gaya dorong ke atas pada kedua ujung jembatan?



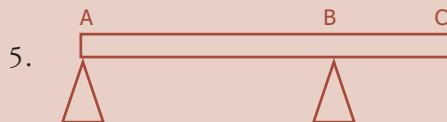
Sebuah silinder pejal bermassa 500 g ($g = 10 \text{ m/s}^2$) dan berjari-jari 10 cm menggelinding menaiki bidang miring seperti pada gambar. Jika kecepatan awal silinder 15 m/s, berapakah ketinggian h yang dicapai?



Berdasarkan gambar di samping, tentukan koordinat titik berat!



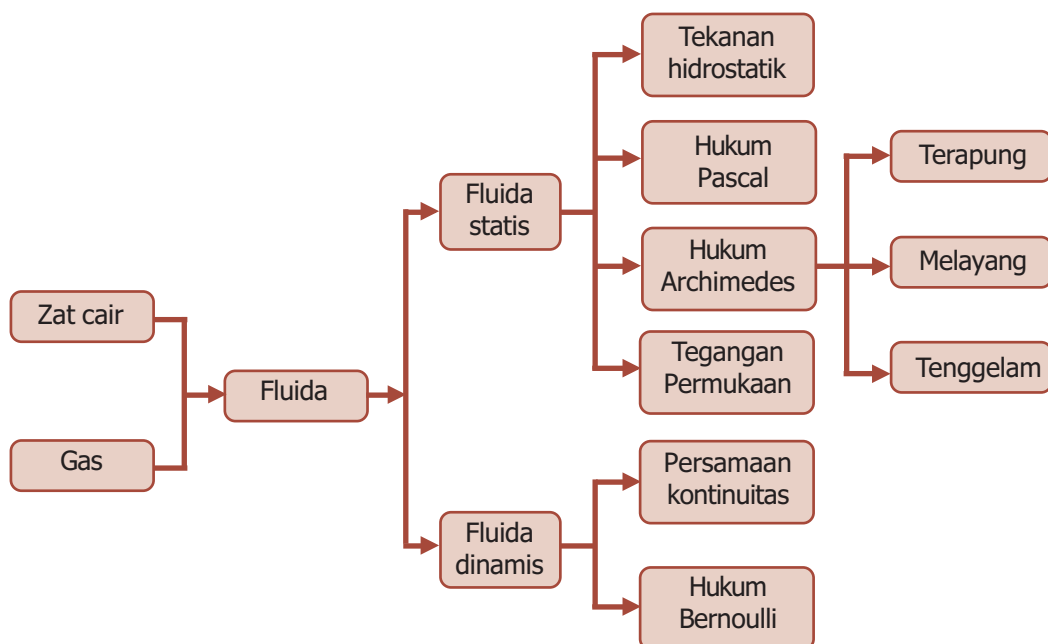
Jika panjang batang AB 0,5 m, beratnya 50 N, dan berat beban 200 N, hitunglah tegangan tali agar sistem setimbang!



Suatu batang AC massanya 40 kg dan panjangnya 3 m ditumpu pada titik A dan B seperti pada gambar. Seorang anak bermassa 25 kg berjalan dari A menuju C. Jika jarak $AB = 2 \text{ m}$ dan percepatan gravitasi 10 m/s^2 , berapakah jarak minimum anak tersebut dari titik C agar papan tetap setimbang?

PETA KONSEP

Bab 7 Fluida



BAB

7

FLUIDA



- Kapal dapat mengapung karena air memiliki gaya ke atas.

Sumber: *CD ClipArt*

Perhatikan gambar di atas. Mengapa kapal bisa terapung di atas air dan tidak tenggelam? Padahal kapal terbuat dari bahan logam yang berat. Kapal tidak tenggelam karena berat kapal sama dengan gaya ke atas yang dikerjakan air laut. Bandingkan jika kalian menjatuhkan sebuah batu ke dalam air, apakah juga akan mengapung? Untuk lebih memahaminya ikuti uraian berikut ini.

Kata Kunci

fluida,
Hukum Archimedes,
Hukum Bernoulli,
Hukum Pascal, kapilaritas,
tegangan permukaan,
tekanan, tekanan
hidrostatik, viskositas

Wujud zat secara umum dibedakan menjadi tiga, yaitu zat padat, cair, dan gas. Berdasarkan bentuk dan ukurannya, zat padat mempunyai bentuk dan volume tetap, zat cair memiliki volume tetap, akan tetapi bentuknya berubah sesuai wadahnya, sedangkan gas tidak memiliki bentuk maupun volume yang tetap. Karena zat cair dan gas tidak mempertahankan bentuk yang tetap sehingga keduanya memiliki kemampuan untuk mengalir. Zat yang dapat mengalir dan memberikan sedikit hambatan terhadap perubahan bentuk ketika ditekan disebut **fluida**. Fluida disebut juga zat alir, yaitu zat cair dan gas.

Pada bab ini kita akan mempelajari mengenai fluida statis, yaitu fluida dalam keadaan diam, dan fluida dinamis, yaitu fluida yang bergerak. Dalam fluida statis kita akan membahas konsep gaya tekan ke atas, tegangan permukaan, kapilaritas, dan viskositas. Sementara itu, dalam fluida dinamis kita akan membahas persamaan dan hukum dasar fluida bergerak dan penerapannya.



A. Tekanan dan Tekanan Hidrostatik



Sumber: Dokumen Penerbit, 2006

Gambar 7.1 Paku dibuat runcing agar mendapat tekanan yang lebih besar.

Konsep tekanan sangat penting dalam mempelajari sifat fluida. **Tekanan** didefinisikan sebagai gaya tiap satuan luas. Apabila gaya F bekerja secara tegak lurus dan merata pada permukaan bidang seluas A , maka tekanan pada permukaan itu dirumuskan:

$$P = \frac{F}{A} \dots\dots\dots (7.1)$$

dengan:

P = tekanan (N/m^2) A = luas (m^2)

F = gaya (N)

Satuan tekanan yang lain adalah pascal (Pa), atmosfer (atm), cm raksa (cmHg), dan milibar (mb).

$1 \text{ N/m}^2 = 1 \text{ Pa}$

$1 \text{ atm} = 76 \text{ cmHg} = 1,01 \times 10^5 \text{ Pa}$

Penerapan konsep tekanan dalam kehidupan sehari-hari misalnya pada pisau dan paku. Ujung paku dibuat runcing dan pisau dibuat tajam untuk mendapatkan tekanan yang lebih besar, sehingga lebih mudah menancap pada benda lain.

Tekanan yang berlaku pada zat cair adalah tekanan hidrostatik, yang dipengaruhi kedalamannya. Hal ini dapat dirasakan oleh perenang atau penyelam yang merasakan adanya tekanan seluruh badan, karena fluida memberikan tekanan ke segala arah.

Besarnya tekanan hidrostatik di sembarang titik di dalam fluida dapat ditentukan sebagai berikut.

Misalnya, sebuah kotak berada pada kedalaman h di bawah permukaan zat cair yang massa jenisnya ρ , seperti Gambar 7.2. Tekanan yang dilakukan zat cair pada alas kotak disebabkan oleh berat zat cair di atasnya. Dengan demikian, besarnya tekanan adalah:

$$P = \frac{F}{A} = \frac{m \cdot g}{A}$$

karena $m = \rho \cdot V$ dan $V = A \cdot h$, maka:

$$P = \frac{\rho \cdot V \cdot g}{A} = \frac{\rho \cdot A \cdot h \cdot g}{A}$$

$$P = \rho \cdot g \cdot h \dots\dots\dots (7.2)$$

dengan:

P = tekanan hidrostatik (N/m^2)

ρ = massa jenis zat cair (kg/m^3)

g = percepatan gravitasi (m/s^2)

h = kedalaman (m)

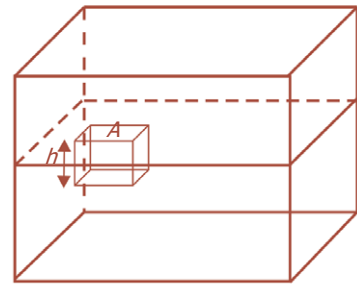
Apabila tekanan udara luar (tekanan barometer) diperhitungkan, maka dari persamaan (7.2) dihasilkan:

$$P = P_0 + \rho g h \dots\dots\dots (7.3)$$

dengan:

P_0 = tekanan udara luar (N/m^2)

Berdasarkan persamaan (7.2) dapat dinyatakan bahwa tekanan di dalam zat cair disebabkan oleh gaya gravitasi, yang besarnya tergantung pada kedalamannya.



Gambar 7.2 Tekanan pada kedalaman h dalam zat cair.



Sumber: *Encyclopedia Britannica*, 2005

Gambar 7.3 Tekanan hidrostatik yang dirasakan penyelam dipengaruhi oleh kedalamannya.

Contoh Soal

Seekor ikan berada pada kedalaman 5 m dari permukaan air sebuah danau. Jika massa jenis air 1.000 kg/m^3 dan percepatan gravitasi 10 m/s^2 , tentukan:

- tekanan hidrostatik yang dialami ikan,
- tekanan total yang dialami ikan!

Penyelesaian:

Diketahui: $h = 5 \text{ m}$

$\rho_{\text{air}} = 1.000 \text{ kg/m}^3$

$P_0 = 1 \text{ atm} = 1 \times 10^5 \text{ N/m}^2$

Ditanya: $P_h = \dots ?$

$P_T = \dots ?$

Jawab:

a. $P_h = \rho \cdot g \cdot h = 1.000 \times 10 \times 5 = 5 \times 10^4 \text{ N/m}^2$

b. $P_T = P_0 + \rho \cdot g \cdot h = (1 \times 10^5) + (5 \times 10^4) = 1,5 \times 10^5 \text{ N/m}^2$

Uji Kemampuan 7.1

Sebuah vas bunga dengan massa 1.500 gram berbentuk prisma segitiga dengan lubang di tengah berbentuk lingkaran. Jika vas tersebut terbuat dari kayu dengan massa jenis $2,7 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$, hitunglah volume lubang tersebut!

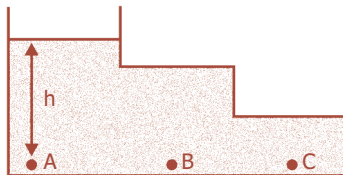


B. Hukum Dasar Fluida Statis

Hukum-hukum dasar tentang fluida statis yang akan kita bahas adalah Hukum Hidrostatika, Hukum Pascal, dan Hukum Archimedes beserta penerapannya.

1. Hukum Pokok Hidrostatika

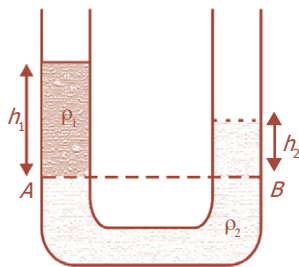
Telah diketahui sebelumnya bahwa tekanan yang dilakukan oleh zat cair besarnya tergantung pada kedalamannya, $P = \rho \cdot g \cdot h$. Hal ini menunjukkan bahwa titik-titik yang berada pada kedalaman yang sama mengalami tekanan hidrostatik yang sama pula. Fenomena ini dikenal dengan Hukum Hidrostatika yang dinyatakan: *Tekanan hidrostatik di semua titik yang terletak pada satu bidang mendatar di dalam satu jenis zat cair besarnya sama.* Perhatikan Gambar 7.4 di samping. Berdasarkan Hukum Pokok Hidrostatika, maka tekanan di titik A, B, dan C besarnya sama.



Gambar 7.4 Tekanan hidrostatik di titik A, B, dan C adalah sama.

$$P_A = P_B = P_C = \rho \cdot g \cdot h$$

Hukum Pokok Hidrostatika dapat digunakan untuk menentukan massa jenis zat cair dengan menggunakan pipa U (Gambar 7.5). Zat cair yang sudah diketahui massa jenisnya (ρ_2) dimasukkan dalam pipa U, kemudian zat cair yang akan dicari massa jenisnya (ρ_1) dituangkan pada kaki yang lain setinggi h_1 . Adapun h_2 adalah tinggi zat cair mula-mula, diukur dari garis batas kedua zat cair. Berdasarkan Hukum Pokok Hidrostatika, maka:



Gambar 7.5 Pipa U untuk menentukan massa jenis zat cair.

$$\begin{aligned} P_A &= P_B \\ \rho_1 \cdot g \cdot h_1 &= \rho_2 \cdot g \cdot h_2 \\ \rho_1 \cdot h_1 &= \rho_2 \cdot h_2 \dots\dots\dots (7.4) \end{aligned}$$

Hidrostatika dimanfaatkan antara lain dalam mendesain bendungan, yaitu semakin ke bawah semakin tebal; serta dalam pemasangan infus, ketinggian diatur sedemikian rupa sehingga tekanan zat cair pada infus lebih besar daripada tekanan darah dalam tubuh.

Contoh Soal

Sebuah pipa U mula-mula diisi dengan air ($\rho = 1.000 \text{ kg/m}^3$), kemudian salah satu kakinya diisi minyak setinggi 10 cm. Jika selisih permukaan air pada kedua kaki 8 cm, berapakah massa jenis air?

Penyelesaian:

Diketahui: $h_1 = 10 \text{ cm}$
 $h_2 = 8 \text{ cm}$
 $\rho_2 = 1.000 \text{ kg/m}^3$

Ditanya: $\rho_1 = \dots ?$

Jawab:

$$\begin{aligned}\rho_1 \cdot h_1 &= \rho_2 \cdot h_2 \\ \rho_1 \times 10 &= 1.000 \times 8 \\ \rho_1 &= 800 \text{ kg/m}^3\end{aligned}$$

2. Hukum Pascal

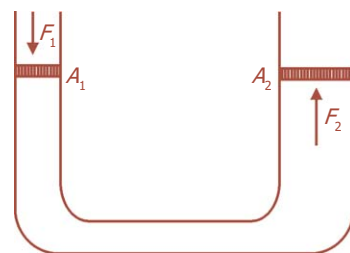
Apabila kita memompa sebuah ban sepeda, ternyata ban akan menggelembung secara merata. Hal ini menunjukkan bahwa tekanan yang kita berikan melalui pompa akan diteruskan secara merata ke dalam fluida (gas) di dalam ban. Selain tekanan oleh beratnya sendiri, pada suatu zat cair (fluida) yang berada di dalam ruang tertutup dapat diberikan tekanan oleh gaya luar. Jika tekanan udara luar pada permukaan zat cair berubah, maka tekanan pada setiap titik di dalam zat cair akan mendapat tambahan tekanan dalam jumlah yang sama. Peristiwa ini pertama kali dinyatakan oleh seorang ilmuwan Prancis bernama Blaise Pascal (1623 - 1662) dan disebut Hukum Pascal. Jadi, dalam Hukum Pascal dinyatakan berikut ini.

“Tekanan yang diberikan pada zat cair dalam ruang tertutup akan diteruskan ke segala arah dengan sama besar”.

Berdasarkan Hukum Pascal diperoleh prinsip bahwa dengan memberikan gaya yang kecil akan dihasilkan gaya yang lebih besar. Prinsip ini dimanfaatkan dalam pesawat hidrolik. Gambar 7.6 menunjukkan sebuah bejana tertutup berisi air yang dilengkapi dua buah pengisap yang luas penampangnya berbeda.

Jika pengisap kecil dengan luas penampang A_1 ditekan dengan gaya F_1 , maka zat cair dalam bejana mengalami tekanan yang besarnya:

$$P_1 = \frac{F_1}{A_1} \dots\dots\dots (7.5)$$



Gambar 7.6 Pesawat hidrolik berdasarkan Hukum Pascal.

Nama Pascal diabadikan sebagai satuan untuk mengukur tekanan. Satu pascal (Pa) adalah suatu tekanan dari kekuatan sebesar 1 newton yang menyebabkan terjadinya suatu proses atas suatu bidang seluas 1 m².

Berdasarkan Hukum Pascal, tekanan yang diberikan akan diteruskan ke segala arah sama besar, sehingga pada pengisap besar dihasilkan gaya F_2 ke atas yang besarnya:

$$F_2 = P_2 \cdot A_2 \text{ atau } P_2 = \frac{F_2}{A_2}$$

karena $P_1 = P_2$, maka:

$$\frac{F_1}{A_1} = \frac{F_2}{A_2} \dots\dots\dots (7.6)$$

dengan:

F_1 = gaya yang dikerjakan pada pengisap 1 (N)

F_2 = gaya yang dikerjakan pada pengisap 2 (N)

A_1 = luas pengisap 1 (m²)

A_2 = luas pengisap 2 (m²)

Untuk pengisap berbentuk silinder, maka $A_1 = \frac{1}{4}\pi d_1^2$ dan $A_2 = \frac{1}{4}\pi d_2^2$, sehingga persamaan (7.6) dapat dituliskan:

$$\begin{aligned} \frac{F_1}{\frac{1}{4}\pi d_1^2} &= \frac{F_2}{\frac{1}{4}\pi d_2^2} \\ \frac{F_1}{d_1^2} &= \frac{F_2}{d_2^2} \dots\dots\dots (7.7) \end{aligned}$$

Alat-alat bantu manusia yang prinsip kerjanya berdasarkan Hukum Pascal adalah dongkrak hidrolik, pompa hidrolik, mesin hidrolik pengangkat mobil, mesin penggerak hidrolik, dan rem hidrolik pada mobil.

Contoh Soal

Sebuah dongkrak hidrolik masing-masing penampangnya berdiameter 3 cm dan 120 cm. Berapakah gaya minimal yang harus dikerjakan pada penampang kecil untuk mengangkat mobil yang beratnya 8.000 N?

Penyelesaian:

Diketahui: $d_1 = 3 \text{ cm} = 0,03 \text{ m}$

$d_2 = 120 \text{ cm} = 1,2 \text{ m}$

$F_2 = 8.000 \text{ N}$

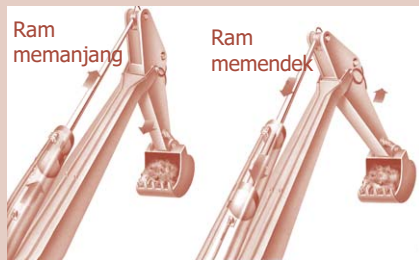
Ditanya: $F_1 = \dots ?$

Jawab:

$$\frac{F_1}{d_1^2} = \frac{F_2}{d_2^2}$$

$$F_1 = \left(\frac{d_1}{d_2} \right)^2 \cdot F_2 = \left(\frac{0,03}{1,2} \right)^2 \times 8.000 = 5 \text{ N}$$

Percikan Fisika



Mendorong dengan Cairan

Pemberian gaya pada permukaan suatu cairan akan meningkatkan tekanan di semua titik di dinding wadah penampungnya. Mesin hidrolik memanfaatkan prinsip ini untuk memindahkan beban berat. Alat penggali mekanik memakai mesin penggerak pompa yang mendesak minyak di sepanjang pipa sehingga memasuki silinder.

Tekanan minyak mendesak piston meluncur di dalam silinder. Minyak dapat mendorong ke kedua sisi piston sehingga menghasilkan gaya yang luar biasa di kedua arah tersebut.

3. Hukum Archimedes

Hukum Archimedes mempelajari tentang gaya ke atas yang dialami oleh benda apabila berada dalam fluida. Benda-benda yang dimasukkan pada fluida seakan-akan mempunyai berat yang lebih kecil daripada saat berada di luar fluida. Misalnya, batu terasa lebih ringan ketika berada di dalam air dibandingkan ketika berada di udara. Berat di dalam air sesungguhnya tetap, tetapi air melakukan gaya yang arahnya ke atas. Hal ini menyebabkan berat batu akan berkurang, sehingga batu terasa lebih ringan. Berdasarkan peristiwa di atas dapat disimpulkan bahwa berat benda di dalam air besarnya:

$$w_{\text{air}} = w_{\text{ud}} - F_A \dots\dots\dots (7.8)$$

dengan:

w_{air} = berat benda di dalam air (N)

w_{ud} = berat benda di udara (N)

F_A = gaya tekan ke atas (N)

Besarnya gaya tekan ke atas dapat ditentukan dengan konsep tekanan hidrostatis. Gambar 7.7 menunjukkan sebuah silinder dengan tinggi h yang luasnya A . Ujung atas dan bawahnya, dicelupkan ke dalam fluida yang massa jenisnya ρ .

Besarnya tekanan hidrostatis yang dialami permukaan atas dan bawah silinder adalah:

$$P_1 = \rho \cdot g \cdot h_1$$

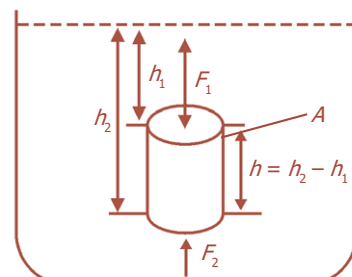
$$P_2 = \rho \cdot g \cdot h_2$$

Sehingga besarnya gaya-gaya yang bekerja:

$$F = P \cdot A$$

$$F_1 = \rho \cdot g \cdot h_1 \cdot A \text{ (ke bawah)}$$

$$F_2 = \rho \cdot g \cdot h_2 \cdot A \text{ (ke atas)}$$



Gambar 7.7 Gaya ke atas oleh fluida.

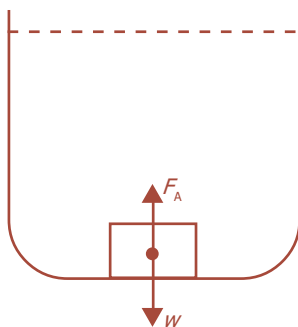
Komet

Kolom mengingat

Menurut Hukum Hidrostatika semua titik yang terletak pada suatu bidang datar di dalam zat cair yang sejenis memiliki tekanan yang sama.

BETA^B Berita Fisika

Archimedes (287 - 212 SM) adalah ilmuwan Yunani terbesar yang menemukan hukum tuas, Hukum Archimedes, kaca pembakar, pelembar batu karang, model orbit bintang, cara mengukur lingkaran, serta cara menghitung jumlah pasir di seluruh angkasa dan mencantumkan dalam bentuk bilangan.



Gambar 7.8 Benda tenggelam karena berat benda lebih besar daripada gaya ke atas.

Gaya total yang disebabkan oleh tekanan fluida merupakan gaya apung atau gaya tekan ke atas yang besarnya:

$$\begin{aligned} F_A &= F_2 - F_1 \\ &= \rho \cdot g \cdot h_2 \cdot A - \rho \cdot g \cdot h_1 \cdot A \\ &= \rho \cdot g \cdot (h_2 - h_1) \cdot A \end{aligned}$$

karena $h_2 - h_1 = h$, maka:

$$F_A = \rho \cdot g \cdot h \cdot A$$

$A \cdot h$ adalah volume benda yang tercelup, sehingga:

$$F_A = \rho \cdot g \cdot V \dots\dots\dots (7.9)$$

dengan:

F_A = gaya ke atas atau Archimedes (N)

ρ = massa jenis fluida (kg/m^3)

g = percepatan gravitasi (m/s^2)

V = volume benda yang tercelup (m^3)

Gaya total $\rho \cdot g \cdot V = m \cdot g$ adalah berat fluida yang dipindahkan. Dengan demikian, gaya tekan ke atas pada benda sama dengan berat fluida yang dipindahkan oleh benda. Pernyataan ini pertama kali dikemukakan oleh Archimedes (287 - 212 SM), yang dikenal dengan Hukum Archimedes, yang berbunyi:

“Sebuah benda yang tercelup sebagian atau seluruhnya di dalam fluida mengalami gaya ke atas yang besarnya sama dengan berat fluida yang dipindahkan”.

a. Tenggelam, Melayang, dan Terapung

Apabila sebuah benda padat dicelupkan ke dalam zat cair, maka ada tiga kemungkinan yang terjadi pada benda, yaitu tenggelam, melayang, atau terapung. Apakah yang menyebabkan suatu benda tenggelam, melayang, atau terapung? Pertanyaan ini dapat dijelaskan dengan Hukum Archimedes.

1) Benda tenggelam

Benda dikatakan tenggelam, jika benda berada di dasar zat cair. Sebuah benda akan tenggelam ke dalam suatu zat cair apabila gaya ke atas yang bekerja pada benda lebih kecil daripada berat benda.

$$w_b > F_A$$

$$m_b \cdot g > \rho_f \cdot g \cdot V_f$$

$$\rho_b \cdot V_b \cdot g > \rho_f \cdot g \cdot V_f$$

karena $V_b > V_f$, maka:

$$\rho_b > \rho_f$$

Jadi, benda tenggelam jika massa jenis benda lebih besar daripada massa jenis zat cair.

2) *Benda melayang*

Benda dikatakan melayang jika seluruh benda tercelup ke dalam zat cair, tetapi tidak menyentuh dasar zat cair. Sebuah benda akan melayang dalam zat cair apabila gaya ke atas yang bekerja pada benda sama dengan berat benda.

$$w_b = F_A$$

$$m_b \cdot g = \rho_f \cdot g \cdot V_f$$

$$\rho_b \cdot V_b \cdot g = \rho_f \cdot g \cdot V_f$$

karena $V_b = V_f$, maka $\rho_b = \rho_f$

Jadi, benda akan melayang jika massa jenis benda sama dengan massa jenis zat cair.

3) *Benda terapung*

Benda dikatakan terapung jika sebagian benda tercelup di dalam zat cair.

Jika volume yang tercelup sebesar V_f , maka gaya ke atas oleh zat cair yang disebabkan oleh volume benda yang tercelup sama dengan berat benda.

$$w_b < F_A$$

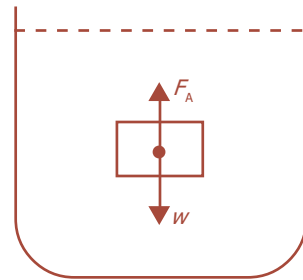
$$m_b \cdot g < \rho_f \cdot g \cdot V_f$$

$$\rho_b \cdot V_b \cdot g < \rho_f \cdot g \cdot V_f$$

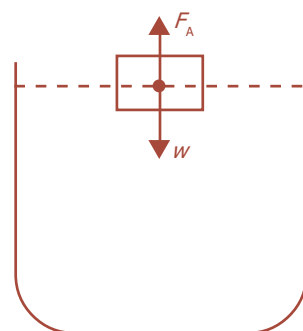
karena $V_b < V_f$, maka $\rho_b < \rho_f$

Jadi, benda akan terapung jika massa jenis benda lebih kecil daripada massa jenis fluida. Apabila volume benda tercelup dalam zat cair V_f dan volume benda total V_b , berlaku:

$$\frac{\rho_b}{\rho_f} = \frac{V_f}{V_b}$$



Gambar 7.9 Benda melayang karena berat benda sama dengan gaya ke atas.



Gambar 7.10 Benda terapung karena berat benda lebih kecil daripada gaya ke atas.

Kegiatan

Tujuan : Memahami Hukum Archimedes.

Alat dan bahan : Panci, bak plastik, air, batu, tali, timbangan pegas, stoples.

Cara Kerja:

1. Masukkan panci ke dalam bak plastik. Isilah panci dengan air hingga penuh.
2. Ikatlah batu dengan benang sehingga kalian dapat mengangkat batu dengan tali tersebut.
3. Kaitkan timbangan pegas ke ujung tali. Kemudian gunakan timbangan tersebut untuk mengangkat batu. Catatlah beratnya.
4. Dengan timbangan pegas yang masih terhubung dengan batu, turunkan batu dengan hati-hati ke dalam air panci hingga benar-benar tenggelam. Air mengalir dari panci ke bak plastik.

5. Catatlah berat batu sekarang.
6. Ikatlah mulut stoples dengan tali untuk mengangkat stoples hanya dengan menggunakan tali tersebut.
7. Kaitkan timbangan pegas ke ujung lain dari tali yang diikatkan pada stoples dan timbanglah stoples kosong tersebut.
8. Keluarkan batu dan panci dari bak plastik.
9. Tuangkan air dalam bak plastik ke dalam stoples.
10. Kaitkan lagi timbangan pegas ke tali pada stoples dan timbanglah stoples yang berisi air tersebut.

Diskusi:

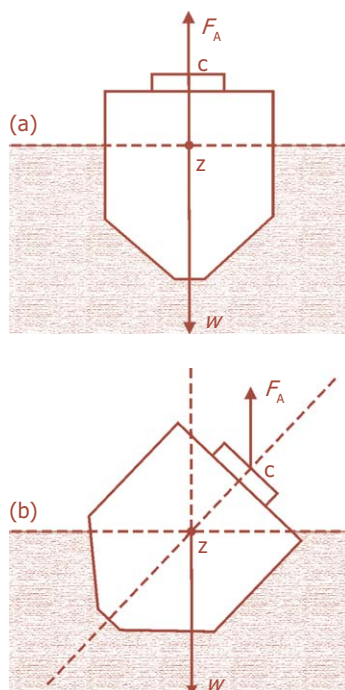
1. Berapakah selisih berat batu di udara dengan berat batu di air? Mengapa ada selisihnya?
2. Hitunglah berat air dalam stoples! Bandingkan berat air dalam stoples dengan selisih berat batu di udara dan di air! Apakah yang kalian temukan?
3. Tunjukkan Hukum Archimedes pada percobaan yang kalian lakukan tersebut. Tulislah kesimpulannya!

b. Penerapan Hukum Archimedes

Beberapa alat yang bekerja berdasarkan Hukum Archimedes, antara lain kapal laut, galangan kapal, hidrometer, dan balon udara.

1) Kapal laut

Kapal laut terbuat dari baja atau besi, dimana massa jenis baja atau besi lebih besar daripada massa jenis air laut. Tetapi mengapa kapal laut bisa terapung? Berdasarkan Hukum Archimedes, kapal dapat terapung karena berat kapal sama dengan gaya ke atas yang dikerjakan oleh air laut, meskipun terbuat dari baja atau besi. Badan kapal dibuat berongga agar volume air yang dipindahkan oleh badan kapal lebih besar. Dengan demikian, gaya ke atas juga lebih besar. Ingat, bahwa gaya ke atas sebanding dengan volume air yang dipindahkan. Kapal laut didesain bukan hanya asal terapung, melainkan harus tegak dan dengan kesetimbangan stabil tanpa berbalik. Kestabilan kapal saat terapung ditentukan oleh posisi titik berat benda, dan titik di mana gaya ke atas bekerja. Gambar 7.11(a) menunjukkan bahwa kapal berada pada posisi stabil. Kapal akan terapung stabil apabila gaya berat benda dan gaya ke atas terletak pada garis vertikal yang sama. Gambar 7.11(b) melukiskan gaya-gaya yang bekerja pada saat kapal dalam posisi miring.



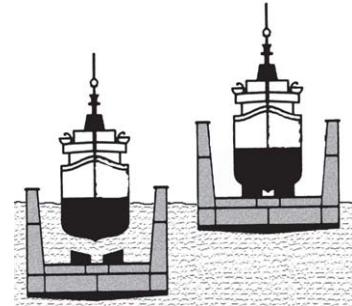
Gambar 7.11 Kestabilan kapal saat terapung ditentukan oleh posisi titik berat benda.

Garis kerja kapal gaya ke atas bergeser melalui titik C, tetapi garis kerja gaya berat tetap melalui titik z. Vektor gaya berat (w) dan gaya ke atas (F_A) membentuk kopel yang menghasilkan torsi yang berlawanan dengan arah putaran jarum jam. Torsi akan mengurangi kemiringan sehingga dapat mengembalikan kapal ke posisi stabil.

2) Galangan kapal

Untuk memperbaiki kerusakan pada bagian bawah kapal, maka kapal perlu diangkat dari dalam air. Alat yang digunakan untuk mengangkat bagian bawah kapal tersebut dinamakan galangan kapal.

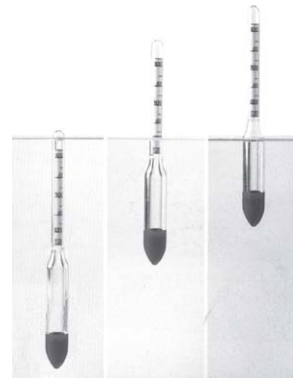
Gambar 7.12 menunjukkan sebuah kapal yang terapung di atas galangan yang sebagian masih tenggelam. Setelah diberi topangan yang kuat sehingga kapal seimbang, air dikeluarkan secara perlahan-lahan. Kapal akan terangkat ke atas setelah seluruh air dikeluarkan dari galangan kapal.



Gambar 7.12 Galangan kapal untuk mengangkat kapal dari air.

3) Hidrometer

Hidrometer merupakan alat yang digunakan untuk mengukur massa jenis zat cair. Semakin rapat suatu cairan, maka semakin besar gaya dorong ke arah atas dan semakin tinggi hidrometer. Hidrometer terbuat dari tabung kaca yang dilengkapi dengan skala dan pada bagian bawah dibebani butiran timbal agar tabung kaca terapung tegak di dalam zat cair. Jika massa jenis zat cair besar, maka volume bagian hidrometer yang tercelup lebih kecil, sehingga bagian yang muncul di atas permukaan zat cair menjadi lebih panjang. Sebaliknya, jika massa jenis zat cair kecil, hidrometer akan terbenam lebih dalam, sehingga bagian yang muncul di atas permukaan zat cair lebih pendek (Gambar 7.13).

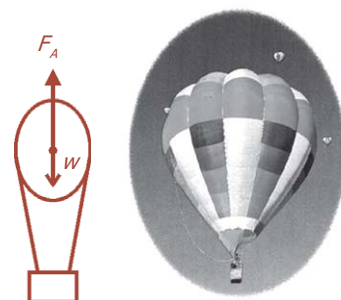


Sumber: *Jendela Iptek Gaya dan Gerak*, PT Balai Pustaka, 2000

Gambar 7.13 Hidrometer untuk mengukur massa jenis zat cair.

4) Balon udara

Udara (gas) termasuk fluida, sehingga dapat melakukan gaya ke atas terhadap benda. Gaya ke atas yang dilakukan benda sama dengan berat udara yang dipindahkan oleh benda. Agar balon dapat bergerak naik, maka balon diisi gas yang massa jenisnya lebih kecil dari massa jenis udara. Sebagai contoh, balon panas berdaya tampung hingga 1.500 m^3 , sehingga bermassa 1.500 kg . Balon menggeser 1.500 m^3 udara dingin di sekitarnya, yang bermassa 2.000 kg , maka balon memperoleh gaya ke atas sebesar 500 N .



balon udara

Sumber: *Jendela Iptek Gaya dan Gerak*, PT Balai Pustaka, 2000

Gambar 7.14 Balon udara diisi gas yang massa jenisnya lebih kecil dari massa jenis udara.

Contoh Soal

1. Suatu benda yang massa jenisnya 800 kg/m^3 terapung di atas permukaan zat cair seperti tampak pada gambar. Berapakah massa jenis zat cair?

Penyelesaian:

Diketahui: $\rho_b = 800 \text{ kg/m}^3$

$$V_f = V_b - \frac{1}{3} V_b = \frac{2}{3} V_b$$

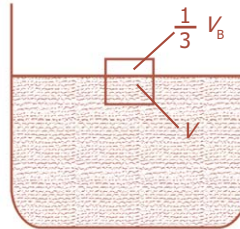
Ditanya: $\rho_f = \dots ?$

Jawab:

$$\frac{\rho_b}{\rho_f} = \frac{V_f}{V_b}$$

$$\frac{800}{\rho_f} = \frac{\frac{2}{3} V_b}{V_b}$$

$$\rho_f = \frac{3}{2} \cdot 800 = 1.200 \text{ kg/m}^3$$



2. Sebuah benda ditimbang di udara beratnya 20 N dan ketika ditimbang di dalam air berat benda menjadi 15 N . Jika massa jenis air 1.000 kg/m^3 dan $g = 10 \text{ m/s}^2$, tentukan:
 - a. gaya ke atas benda oleh air,
 - b. massa jenis benda!

Penyelesaian:

Diketahui: $w_{ud} = 20 \text{ N}$

$\rho_{air} = 1.000 \text{ kg/m}^3$

$w_{air} = 15 \text{ N}$

$g = 10 \text{ m/s}^2$

Ditanya: a. $F_A = \dots ?$

b. $\rho_b = \dots ?$

Jawab:

$$a. \quad w_{air} = w_{ud} - F_A \quad \rightarrow \quad F_A = (20 - 15) \text{ N} = 5 \text{ N}$$

$$b. \quad m = \frac{w_{ud}}{g} = \frac{20}{10} = 2 \text{ kg}$$

$$\rho_b = \frac{m}{V_1} = \frac{w_{ud} \cdot \rho_{air}}{F} = \frac{20 \times 1000}{5} = 4.000 \text{ kg/m}^3$$

Kegiatan

Tujuan : Mengetahui bagaimana kapal mengapung.

Alat dan bahan : Kertas aluminium, klip kertas, ember, air, gunting.

Cara Kerja:

1. Potonglah kertas aluminium dengan bentuk bujur sangkar dua buah.
2. Bungkuslah 10 klip kertas dengan salah satu potongan kertas aluminium, remas-remaslah kertas tersebut sehingga membentuk bola.



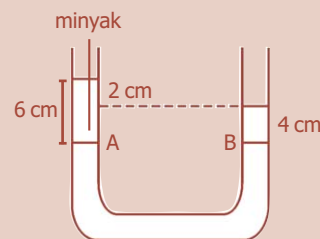
3. Lipatlah empat tepi kertas aluminium kedua berbentuk kotak kecil.
4. Letakkan 10 klip kertas pada kotak tersebut secara rata.
5. Isilah ember dengan air.
6. Letakkan kotak dan bola kertas tersebut di permukaan air dalam ember.

Diskusi:

1. Bola kertas dan kotak memiliki berat yang sama, tetapi mengapa bola kertas tenggelam sedangkan kotak tetap mengapung?
2. Hukum apa yang mendasari percobaan tersebut?
3. Tulislah kesimpulan dari percobaan yang telah kalian lakukan tersebut!

Uji Kemampuan 7.2

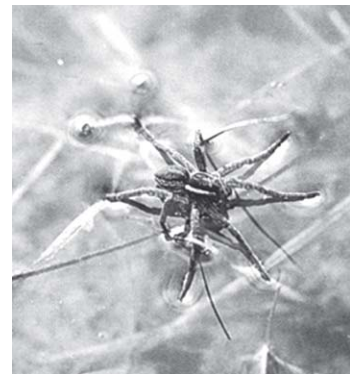
1. Dari gambar di samping, jika massa jenis air 1.000 kg/m^3 , tentukan massa jenis minyak!
2. Sebuah kubus dengan sisi 30 cm digantungkan dengan tali. Tentukan gaya apung yang dikerjakan fluida jika: (diketahui $\rho = 1.000 \text{ kg/m}^3$)
 - a. dicelupkan setengahnya,
 - b. dicelupkan seluruhnya!



C. Tegangan Permukaan

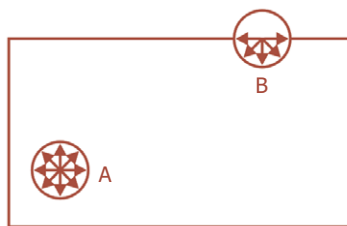
Apabila sebuah silet diletakkan mendatar pada permukaan air dengan hati-hati, ternyata silet terapung. Padahal massa jenis silet lebih besar dari massa jenis air. Zat cair yang keluar dari suatu pipet bukan sebagai aliran tetapi sebagai tetesan. Demikian juga, nyamuk atau serangga dapat hinggap di permukaan air. Peristiwa-peristiwa tersebut berhubungan dengan gaya-gaya yang bekerja pada permukaan zat cair, atau pada batas antara zat cair dengan bahan lain. Jika kita amati contoh-contoh di atas, ternyata permukaan air tertekan ke bawah karena berat silet atau nyamuk. Jadi, permukaan air tampak seperti kulit yang tegang. Sifat tegang permukaan air inilah yang disebut **tegangan permukaan**.

Tegangan permukaan zat cair dapat dijelaskan dengan memerhatikan gaya yang dialami oleh partikel zat cair. Jika dua partikel zat cair berdekatan akan terjadi gaya tarik-menarik.



Sumber: *Jendela Iptek Bumi*, PT Balai Pustaka, 2000

Gambar 7.15 Anggang-anggang dapat hinggap di permukaan air karena adanya tegangan permukaan.



Gambar 7.16 Gaya tarik-menarik antara partikel di dalam zat cair (A) dan di permukaan zat cair (B).

Gaya tarik-menarik antara partikel-partikel yang sejenis disebut **kohesi**. Gambar 7.16 melukiskan sebuah molekul di dalam zat cair yang dapat dianggap sebagai sebuah bola besar sehingga gaya kohesi di luar bola diabaikan.

Bola A adalah molekul yang berada dalam zat cair, sedangkan bola B adalah molekul yang berada di permukaan zat cair. Pada bola A, bekerja gaya sama besar ke segala arah sehingga resultan gaya yang bekerja pada A sama dengan nol.

Pada bola B, hanya bekerja gaya P yang arahnya ke bawah dan ke samping, sehingga resultan gaya-gaya yang bekerja berarah ke bawah. Resultan gaya ini yang mengakibatkan lapisan atas zat cair seakan-akan tertutup oleh selaput yang elastis.

Secara kuantitatif, tegangan permukaan didefinisikan sebagai besarnya gaya yang dialami oleh tiap satuan panjang pada permukaan zat cair yang dirumuskan:

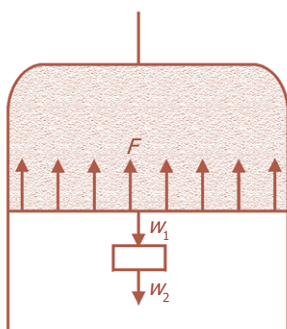
$$\gamma = \frac{F}{\ell} \dots\dots\dots (7.10)$$

dengan:

γ = tegangan permukaan (N/m)

F = gaya pada permukaan zat cair (N)

ℓ = panjang permukaan (m)



Gambar 7.17 Tegangan permukaan pada kawat.

Besarnya tegangan permukaan zat cair dapat ditentukan dengan menggunakan sebuah kawat yang dibengkokkan sehingga berbentuk U. Selanjutnya, seutas kawat lurus dipasang sehingga dapat bergerak pada kaki-kaki kawat U (Gambar 7.17).

Jika kawat dicelupkan ke dalam larutan sabun dan diangkat keluar, maka kawat lurus akan tertarik ke atas. Apabila berat w_1 tidak terlalu besar, maka dapat diseimbangkan dengan menambah beban w_2 .

Dalam keadaan setimbang kawat lurus dapat digeser tanpa mengubah keseimbangannya selama suhunya tetap. Pada keadaan setimbang, maka gaya permukaan air sabun sama dengan gaya berat kawat lurus dijumlahkan dengan berat beban.

$$F = w_1 + w_2$$

Karena lapisan air sabun memiliki dua permukaan maka gaya permukaan bekerja sepanjang 2ℓ , maka tegangan permukaan zat cair dapat dinyatakan:

$$\gamma = \frac{F}{2\ell}$$

1. Sudut Kontak

Zat terdiri atas partikel-partikel, dan partikel dikelilingi oleh partikel-partikel lainnya dengan jarak yang berdekatan. Antara partikel satu dengan yang lainnya terjadi gaya tarik-menarik. Gaya tarik-menarik antara partikel-partikel yang sejenis disebut **kohesi**, sedangkan gaya tarik-menarik antara partikel-partikel yang tidak sejenis disebut **adhesi**.

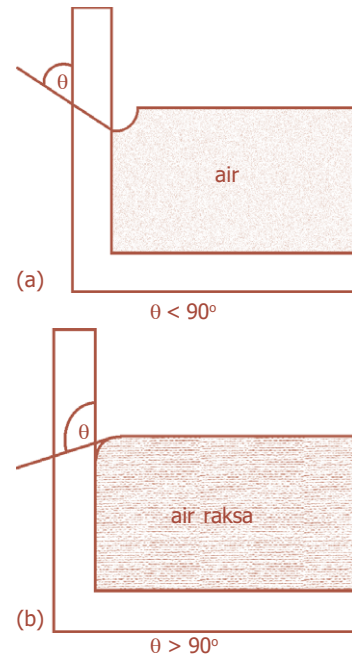
Setetes air yang jatuh di permukaan kaca mendarat akan meluas permukaannya. Hal ini terjadi karena adhesi air pada kaca lebih besar daripada kohesinya. Sementara itu, jika air raksa jatuh pada permukaan kaca maka akan mengumpul berbentuk bulatan. Hal ini karena kohesi air raksa lebih besar daripada adhesi pada kaca.

Permukaan air di dalam tabung melengkung ke atas pada bagian yang bersentuhan dengan dinding kaca. Kelengkungan permukaan zat cair itu disebut **meniskus**. Permukaan air pada tabung disebut meniskus cekung, yang membentuk sudut sentuh θ . Sudut kelengkungan permukaan air terhadap dinding vertikal disebut sudut kontak. Permukaan air pada tabung membentuk sudut kontak lebih kecil dari 90° (lancip). Hal ini karena adhesi air pada dinding tabung lebih besar daripada kohesinya sehingga air membasahi dinding tabung.

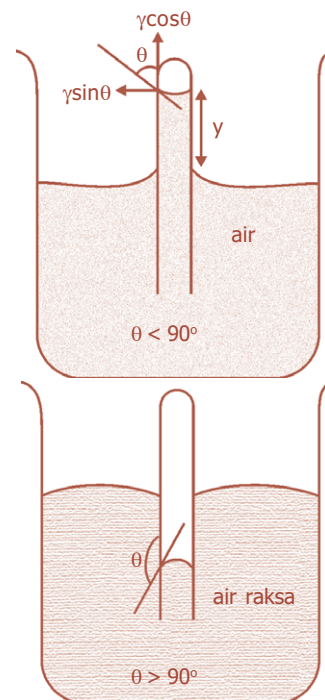
Permukaan air raksa dalam tabung melengkung ke bawah pada bagian yang bersentuhan dengan dinding tabung. Permukaan air raksa pada tabung disebut meniskus cembung, dengan sudut kontak lebih besar dari 90° (tumpul). Hal ini karena kohesi air raksa pada dinding tabung lebih besar daripada adhesi air raksa dengan dinding kaca sehingga air raksa tidak membasahi dinding kaca.

2. Gejala Kapilaritas

Apabila sebatang pipa dengan diameter kecil, kemudian salah satu ujungnya dimasukkan dalam air, maka air akan naik ke dalam pipa, sehingga permukaan air di dalam pipa lebih tinggi daripada permukaan air di luar pipa. Akan tetapi, jika pipa dimasukkan ke dalam air raksa, maka permukaan air raksa di dalam pipa lebih rendah daripada permukaan air raksa di luar pipa. Gejala ini dikenal sebagai **gejala kapilaritas**, yang disebabkan oleh gaya kohesi dari tegangan permukaan dan gaya antara zat cair dengan tabung kaca (pipa). Pada zat cair yang membasahi dinding ($\theta < 90^\circ$), mengakibatkan zat cair dalam pipa naik, sebaliknya, jika $\theta > 90^\circ$, permukaan zat cair dalam pipa lebih rendah daripada permukaan zat cair di luar pipa.



Gambar 7.18 (a) Air membasahi dinding kaca, (b) Air raksa tidak membasahi dinding kaca.



Gambar 7.19 Gejala kapilaritas, disebabkan gaya kohesi dan gaya.



Sumber: *Jendela Iptek Bumi*, PT Balai Pustaka, 2000

Gambar 7.20 Zat cair naik dalam tabung kapiler.

Apabila jari-jari tabung r , massa jenis zat cair ρ , besarnya sudut kontak θ , tegangan permukaan γ , kenaikan zat cair setinggi y , dan permukaan zat cair bersentuhan dengan tabung sepanjang keliling lingkaran $2\pi r$, maka besarnya gaya ke atas adalah hasil kali komponen-komponen tegangan permukaan yang vertikal dengan keliling dalam tabung. Secara matematis dituliskan:

$$\gamma = \frac{F}{\ell}$$

$$F = \gamma \cdot \ell$$

$$F = \gamma \cdot \cos \theta \cdot 2\pi r$$

$$F = 2\pi \gamma r \cos \theta$$

Gaya ke bawah adalah gaya berat, yang besarnya adalah: $w = m \cdot g$.

Karena $m = \rho \cdot V$ dan $V = \pi r^2 \cdot y$, maka:

$$w = (\rho \cdot \pi r^2 \cdot y) \cdot g$$

$$w = \rho \cdot g \cdot \pi r^2 \cdot y$$

Dengan menyamakan gaya ke atas dan gaya ke bawah maka diperoleh:

$$F = w$$

$$2\pi \gamma r \cos \theta = \rho \cdot g \cdot \pi r^2 \cdot y$$

$$y = \frac{2\gamma \cos \theta}{\rho \cdot g \cdot r} \dots\dots\dots (7.11)$$

dengan:

y = naik/turunnya zat cair dalam kapiler (m)

γ = tegangan permukaan (N/m)

θ = sudut kontak

ρ = massa jenis zat cair (kg/m^3)

g = percepatan gravitasi (m/s^2)

r = jari-jari penampang pipa (m)

Berikut ini beberapa contoh yang menunjukkan gejala kapilaritas dalam kehidupan sehari-hari.

- Naiknya minyak tanah melalui sumbu kompor sehingga kompor bisa dinyalakan.
- Kain dan kertas isap dapat menghisap cairan.
- Air dari akar dapat naik pada batang pohon melalui pembuluh kayu.

Selain keuntungan, kapilaritas dapat menimbulkan beberapa masalah berikut ini.

- Air hujan merembes dari dinding luar, sehingga dinding dalam juga basah.
- Air dari dinding bawah rumah merembes naik melalui batu bata menuju ke atas sehingga dinding rumah lembap.



Sumber: *Dokumen Penerbit*, 2006

Gambar 7.21 Kain yang dimasukkan ke dalam gelas yang berisi air, akan basah perlahan-lahan.

Contoh Soal

Pipa kapiler yang berjari-jari 2 mm dimasukkan tegak lurus ke dalam zat cair yang memiliki tegangan permukaan 3×10^{-2} N/m. Ternyata permukaan zat cair dalam pipa naik 2 mm. Jika sudut kontak zat cair 37° dan $g = 10 \text{ m/s}^2$, hitunglah massa jenis zat cair!

Penyelesaian:

$$\begin{aligned} \text{Diketahui: } r &= 2 \text{ mm} = 2 \times 10^{-3} \text{ m} & \theta &= 37^\circ \\ \gamma &= 3 \times 10^{-2} \text{ N/m} & g &= 10 \text{ m/s}^2 \\ y &= 2 \text{ mm} = 2 \times 10^{-3} \text{ m} \end{aligned}$$

Ditanya: $\rho = \dots ?$

Jawab:

$$\begin{aligned} y &= \frac{2\gamma \cos \theta}{\rho \cdot g \cdot r} \\ \rho &= \frac{2\gamma \cos \theta}{y \cdot g \cdot r} \\ &= \frac{(2)(3 \times 10^{-2})(\cos 37^\circ)}{(2 \times 10^{-3})(10)(2 \times 10^{-3})} = 1,2 \times 10^3 \text{ kg/m}^3 \end{aligned}$$

3. Viskositas

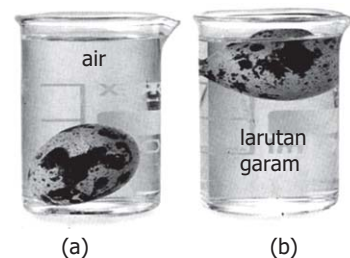
Pernahkah kalian memasukkan sebutir telur ke dalam wadah berisi air? Bagaimanakah gerakan telur dalam air tersebut? Apabila sebutir telur diletakkan dalam air, maka sesuai Hukum Archimedes, telur akan mendapat gaya ke atas oleh air, sehingga gerak telur dalam air akan lebih lambat daripada gerak telur di udara. Bagaimanakah gerakan telur jika dijatuhkan dalam larutan garam? Jika kita bandingkan, ternyata gerak telur dalam larutan garam lebih lambat daripada gerak telur dalam air tawar. Hal ini menunjukkan bahwa gerak dalam zat cair ditentukan oleh kekentalan zat cair. Semakin kental zat cair, maka semakin sulit suatu benda untuk bergerak. Dengan demikian, dapat dikatakan semakin kental zat cair, makin besar pula gaya gesekan dalam zat cair tersebut. Ukuran kekentalan zat cair atau gesekan dalam zat cair disebut **viskositas**.

Gaya gesek dalam zat cair tergantung pada koefisien viskositas, kecepatan relatif benda terhadap zat cair, serta ukuran dan bentuk geometris benda. Untuk benda yang berbentuk bola dengan jari-jari r , gaya gesek zat cair dirumuskan:

$$F = 6\pi\eta \cdot r \cdot v \dots\dots\dots (7.12)$$

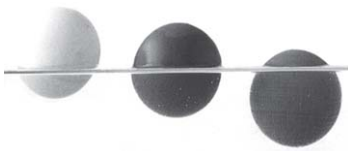
dengan:

F = gaya gesek Stokes (N)



Sumber: *Jendela Iptek Bumi*,
PT Balai Pustaka, 2000

Gambar 7.22 Gerak telur di dalam air (a) lebih cepat dibandingkan gerak telur di larutan garam (b).



Sumber: *Jendela Iptek Gaya dan Gerak*, PT Balai Pustaka, 2000

Gambar 7.23 Bola yang jatuh ke dalam fluida mengalami beberapa gaya.

η = koefisien viskositas (Ns/m²)

r = jari-jari bola (m)

v = kelajuan bola (m/s)

Persamaan (7.12) disebut Hukum Stokes.

Gambar 7.23 menunjukkan sebuah bola yang jatuh bebas ke dalam fluida. Selama gerakannya, pada bola bekerja beberapa gaya, yaitu gaya berat, gaya ke atas (gaya Archimedes), dan gaya Stokes. Pada saat bola dijatuhkan dalam fluida, bola bergerak dipercepat vertikal ke bawah. Karena kecepatannya bertambah, maka gaya Stokes juga bertambah, sehingga suatu saat bola berada dalam keadaan setimbang dengan kecepatan tetap. Kecepatan bola pada saat mencapai nilai maksimum dan tetap disebut kecepatan terminal.

Pada saat bola dalam keadaan setimbang, maka resultan gaya yang bekerja pada bola sama dengan nol.

$$R_F = 0$$

$$F_A + F_s = w_b$$

Karena volume bola $V = \frac{4}{3}\pi r^3$ dan $m = \rho \cdot V$, maka:

$$\rho_f \cdot g \left(\frac{4}{3}\pi r^3 \right) + 6\pi\eta rv = \frac{4}{3}\pi r^3 \cdot \rho_b \cdot g$$

$$6\pi\eta rv = \frac{4}{3}\pi r^3 \cdot \rho_b \cdot g - \frac{4}{3}\pi r^3 \cdot \rho_f \cdot g$$

$$6\pi\eta rv = \frac{4}{3}\pi r^3 \cdot g(\rho_b - \rho_f)$$

$$\eta = \frac{2r^2 g}{9v}(\rho_b - \rho_f)$$

dengan:

η = koefisien viskositas (Ns/m²)

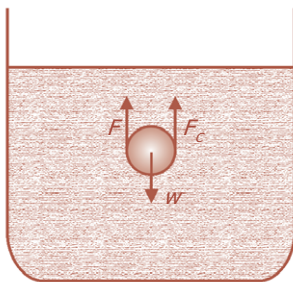
r = jari-jari bola (m)

ρ_b = massa jenis bola (kg/m³)

ρ_f = massa jenis fluida (kg/m³)

g = percepatan gravitasi (m/s²)

v = kecepatan terminal bola (m/s)



Gambar 7.24 Gaya-gaya yang bekerja pada benda yang jatuh bebas dalam fluida.

Contoh Soal

Sebuah bola dengan jari-jari 1 mm dan massa jenisnya 2.500 kg/m³ jatuh ke dalam air. Jika koefisien viskositas air 1×10^{-3} Ns/m² dan $g = 10$ m/s², tentukan kecepatan terminal bola!

Penyelesaian:

$$\begin{aligned} \text{Diketahui: } r &= 1 \text{ mm} = 1 \times 10^{-3} \text{ m} & \rho_f &= 1.000 \text{ kg/m}^3 \\ \eta &= 1 \times 10^{-3} \text{ Ns/m}^2 & g &= 10 \text{ m/s}^2 \\ \rho_b &= 2.500 \text{ kg/m}^3 \end{aligned}$$

Ditanya: $v = \dots ?$

Jawab:

$$\begin{aligned} v &= \frac{2r^2 \cdot g}{9\eta} (\rho_b - \rho_f) \\ &= \frac{2 \times (10^{-3})^2 \times 10}{9 \times 10^{-3}} (2.500 - 1.000) \\ &= 3,3 \text{ m/s} \end{aligned}$$

Uji Kemampuan 7.3

1. Pembuluh kayu suatu pohon memiliki diameter 4 cm digunakan untuk mengangkut air dan mineral dari dalam tanah. Jika sudut kontak 0° , tegangan permukaan air 0,0735 N/m dan percepatan gravitasinya 10 m/s^2 , tentukan tinggi kenaikan air dan mineral dari permukaan tanah!
2. Suatu gelembung gas berdiameter 4 cm naik secara tetap di dalam larutan dengan massa jenis $1,75 \text{ g/cm}^3$ dengan kecepatan 5 cm/s. Jika massa jenis gas dianggap nol, tentukan koefisien viskositas larutan tersebut!
3. Dengan menggunakan timbangan, sepotong logam campuran memiliki berat terukur 86 gram di udara dan 73 gram ketika di air. Tentukan volume dan massa jenisnya!

Percikan Fisika



Adhesi Makhluk Hidup

Beberapa jenis hewan seperti cicak dan kadal dapat menempel pada dinding atau langit-langit. Mengapa itu bisa terjadi? Pada bagian tubuh hewan-hewan tersebut terdapat gaya adhesi yang kuat. Hal ini membuat mereka dapat memanjat dan berjalan pada dinding atau langit-langit. Untuk melepaskan telapak kakinya, hewan tersebut mengangkat jari-jari kakinya dari arah depan.



Fluida Dinamis

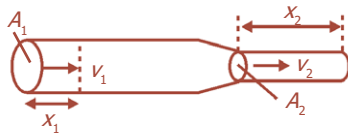
Fluida dinamis adalah fluida yang mengalir atau bergerak terhadap sekitarnya. Pada pembahasan fluida dinamis, kita akan mempelajari mengenai persamaan kontinuitas, dan Hukum Bernoulli beserta penerapannya. Materi kali ini hanya dibatasi pada fluida ideal.

1. Fluida Ideal

Fluida ideal mempunyai ciri-ciri berikut ini.

- Alirannya tunak (*steady*), yaitu kecepatan setiap partikel fluida pada satu titik tertentu adalah tetap, baik besar maupun arahnya. Aliran tunak terjadi pada aliran yang pelan.
- Alirannya tak rotasional, artinya pada setiap titik partikel fluida tidak memiliki momentum sudut terhadap titik tersebut. Alirannya mengikuti garis arus (*streamline*).
- Tidak kompresibel (tidak termampatkan), artinya fluida tidak mengalami perubahan volume (massa jenis) karena pengaruh tekanan.
- Tak kental, artinya tidak mengalami gesekan baik dengan lapisan fluida di sekitarnya maupun dengan dinding tempat yang dilaluinya. Kekentalan pada aliran fluida berkaitan dengan viskositas.

2. Persamaan Kontinuitas



Gambar 7.25 Aliran fluida pada pipa yang berbeda penampangnya.

Gambar 7.25 menunjukkan aliran fluida ideal dalam sebuah pipa yang berbeda penampangnya. Kecepatan fluida pada penampang A_1 adalah v_1 dan pada penampang A_2 sebesar v_2 .

Dalam selang waktu Δt partikel-partikel dalam fluida bergerak sejauh $x = v \Delta t$ sehingga massa fluida Δm yang melalui penampang A_1 dalam waktu Δt adalah:

$$\Delta m_1 = \rho.V = \rho.A_1.v_1.\Delta t$$

Dengan cara yang sama, maka besarnya massa fluida Δm_2 yang melalui penampang A_2 adalah:

$$\Delta m_2 = \rho.A_2.v_2.\Delta t$$

Karena fluida ideal, maka massa fluida yang melalui penampang A_1 sama dengan massa fluida yang melalui A_2 , sehingga:

$$\begin{aligned} \Delta m_1 &= \Delta m_2 \\ \rho.A_1.v_1.\Delta t &= \rho.A_2.v_2.\Delta t \\ A_1v_1 &= A_2v_2 \dots\dots\dots (7.13) \end{aligned}$$

dengan:

A_1 = luas penampang 1 (m^2)

A_2 = luas penampang 2 (m^2)

v_1 = kecepatan aliran fluida pada penampang 1 (m/s)

v_2 = kecepatan aliran fluida pada penampang 2 (m/s)

Persamaan (7.13) disebut sebagai persamaan kontinuitas.

Komet

Kolom mengingat

Persamaan kontinuitas dirumuskan: $A_1v_1 = A_2v_2$. Perkalian Av adalah laju aliran volume $\frac{dV}{dt}$ laju dimana volume melewati penampang tabung.

Persamaan kontinuitas menyatakan bahwa pada fluida tak kompresibel dan tunak, kecepatan aliran fluida berbanding terbalik dengan luas penampangnya. Pada pipa yang luas penampangnya kecil, maka alirannya besar.

Hasil kali $A \cdot v$ adalah **debit**, yaitu banyaknya fluida yang mengalir melalui suatu penampang tiap satuan waktu, dirumuskan:

$$Q = A \cdot v \text{ atau } Q = \frac{A \cdot v \cdot t}{t}$$

karena $v \cdot t = x$ dan $A \cdot x = V$, maka:

$$Q = \frac{V}{t} \dots\dots\dots (7.14)$$

dengan:

Q = debit (m^3/s); V = volume fluida (m^3); t = waktu (s)

Contoh Soal

Air mengalir melalui pipa mendatar dengan diameter pada masing-masing ujungnya 6 cm dan 2 cm. Jika pada penampang besar, kecepatan air 2 m/s, berapakah kecepatan aliran air pada penampang kecil?

Penyelesaian:

Diketahui: $d_1 = 6 \text{ cm}$; $d_2 = 2 \text{ cm}$; $v_1 = 2 \text{ m/s}$

Ditanya: $v_2 = \dots ?$

Jawab:

$$A_1 v_1 = A_2 v_2$$

$$\frac{v_2}{v_1} = \frac{A_1}{A_2}$$

$$A = \pi r^2 = \frac{1}{4} \pi d^2$$

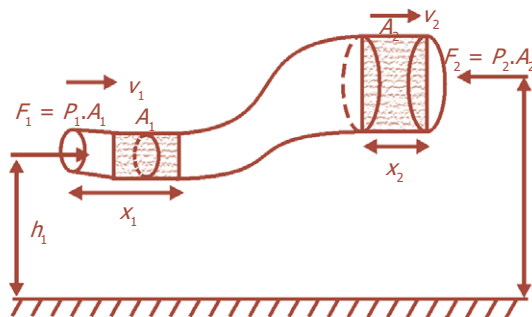
$$\text{sehingga: } \frac{v_2}{v_1} = \frac{r_1^2}{r_2^2} = \frac{d_1^2}{d_2^2} \rightarrow \frac{v_2}{v_1} = \frac{d_1^2}{d_2^2} = \left(\frac{d_1}{d_2}\right)^2 = \left(\frac{6}{2}\right)^2$$

$$\frac{v_2}{2} = \left(\frac{6}{2}\right)^2$$

$$v_2 = 18 \text{ m/s}$$

3. Hukum Bernoulli

Hukum Bernoulli membahas mengenai hubungan antara kecepatan aliran fluida, ketinggian, dan tekanan dengan menggunakan konsep usaha dan energi. Perhatikan Gambar 7.26. Fluida mengalir melalui pipa yang luas penampang dan ketinggiannya berbeda.



Gambar 7.26 Kekekalan energi pada aliran fluida.

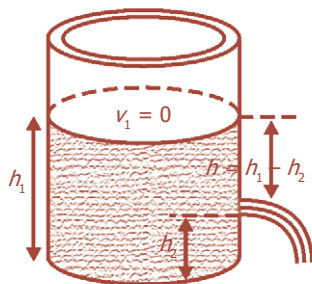


Daniel Bernoulli (1700 - 1782) berasal dari Swiss banyak membuat temuan-temuan penting dalam ilmu ukur ruang dan menulis buku mengenai hidrodinamika, kajian mengenai fluida.

Komet

Kolom mengingat

Asas Bernoulli menyatakan bahwa semakin besar kecepatan fluida, maka semakin kecil tekanannya. Sebaliknya, semakin kecil kecepatan fluida, maka semakin besar tekanannya.



Gambar 7.27 Kecepatan aliran zat cair pada lubang dipengaruhi ketinggian lubang.

Fluida mengalir dari penampang A_1 ke ujung pipa dengan penampang A_2 karena adanya perbedaan tekanan kedua ujung pipa. Apabila massa jenis fluida ρ , laju aliran fluida pada penampang A_1 adalah v_1 , dan pada penampang A_2 sebesar v_2 . Bagian fluida sepanjang $x_1 = v_1 \cdot t$ bergerak ke kanan oleh gaya $F_1 = P_1 \cdot A_1$ yang ditimbulkan tekanan P_1 . Setelah selang waktu t sampai pada penampang A_2 sejauh $x_2 = v_2 \cdot t$. Gaya F_1 melakukan usaha sebesar:

$$W_1 = +F_1 \cdot x_1 = P_1 \cdot A_1 \cdot x_1$$

Sementara itu, gaya F_2 melakukan usaha sebesar:

$$W_2 = -F_2 \cdot x_2 = -P_2 \cdot A_2 \cdot x_2$$

(tanda negatif karena gaya F_2 berlawanan dengan arah gerak fluida).

Sehingga usaha total yang dilakukan adalah:

$$W = W_1 + W_2$$

$$W = P_1 \cdot A_1 \cdot x_1 - P_2 \cdot A_2 \cdot x_2$$

karena $A_1 \cdot x_1 = A_2 \cdot x_2 = V$ dan $V = \frac{m}{\rho}$, maka:

$$W = P_1 \frac{m}{\rho} - P_2 \frac{m}{\rho} = (P_1 - P_2) \frac{m}{\rho}$$

W adalah usaha total yang dilakukan pada bagian fluida yang volumenya $V = A_1 \cdot x_1 = A_2 \cdot x_2$, yang akan menjadi tambahan energi mekanik total pada bagian fluida tersebut.

$$Em = \Delta Ek + \Delta Ep$$

$$= \left(\frac{1}{2} m v_2^2 - \frac{1}{2} m v_1^2 \right) + (m g h_2 - m g h_1)$$

sehingga:

$$W = \Delta Em$$

$$(P_1 - P_2) \frac{m}{\rho} = \left(\frac{1}{2} m v_2^2 - \frac{1}{2} m v_1^2 \right) + (m g h_2 - m g h_1)$$

$$P_1 + \frac{1}{2} \rho v_1^2 + \rho g h_1 = P_2 + \frac{1}{2} \rho v_2^2 + \rho g h_2 \dots\dots\dots (7.15a)$$

Atau di setiap titik pada fluida yang bergerak berlaku:

$$P + \frac{1}{2} \rho v^2 + \rho g h = \text{konstan} \dots\dots\dots (7.15b)$$

Persamaan (7.15) disebut Persamaan Bernoulli.

Penerapan Hukum Bernoulli dalam kehidupan sehari-hari diuraikan berikut ini.

a. Teori Torricelli

Persamaan Bernoulli dapat digunakan untuk menentukan kecepatan zat cair yang keluar dari lubang pada dinding tabung (Gambar 7.27). Dengan menganggap diameter tabung lebih besar dibandingkan diameter lubang, maka permukaan zat cair pada tabung turun perlahan-lahan, sehingga kecepatan v_1 dapat dianggap nol.

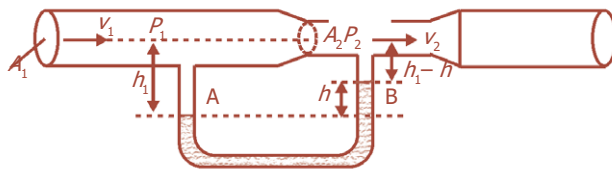
Titik 1 (permukaan) dan 2 (lubang) terbuka terhadap udara sehingga tekanan pada kedua titik sama dengan tekanan atmosfer, $P_1 = P_2$, sehingga persamaan Bernoulli dinyatakan:

$$\begin{aligned}\frac{1}{2}\rho v_2^2 + \rho g h_2 &= 0 + \rho g h_1 \\ \frac{1}{2}\rho v_2^2 &= \rho g(h_1 - h_2) \\ v &= \sqrt{2g(h_1 - h_2)} = \sqrt{2gh} \dots\dots\dots (7.16)\end{aligned}$$

Persamaan (7.16) disebut teori Torricelli, yang menyatakan bahwa kecepatan aliran zat cair pada lubang sama dengan kecepatan benda yang jatuh bebas dari ketinggian yang sama.

b. Venturimeter

Venturimeter adalah alat yang digunakan untuk mengukur laju aliran zat cair dalam pipa. Zat cair dengan massa jenis ρ mengalir melalui pipa yang luas penampangnya A_1 . Pada bagian pipa yang sempit luas penampangnya A_2 .



Gambar 7.28 Venturimeter dilengkapi manometer.

Venturimeter yang dilengkapi manometer yang berisi zat cair dengan massa jenis ρ_2' , seperti Gambar 7.28 di atas. Berdasarkan persamaan kontinuitas, pada titik 1 dan 2 dapat dinyatakan:

$$\begin{aligned}A_1 v_1 &= A_2 v_2 \\ v_2 &= \frac{A_1 v_1}{A_2} \dots\dots\dots (i)\end{aligned}$$

Berdasarkan persamaan Bernoulli, berlaku:

$$\begin{aligned}P_1 + \frac{1}{2}\rho v_1^2 + \rho g h_1 &= P_2 + \frac{1}{2}\rho v_2^2 + \rho g h_2 \\ \text{karena } h_1 &= h_2, \text{ maka:} \\ P_1 + \frac{1}{2}\rho v_1^2 &= P_2 + \frac{1}{2}\rho v_2^2 \dots\dots\dots (ii)\end{aligned}$$

Dari persamaan (i) dan (ii)

$$\begin{aligned}P_1 + \frac{1}{2}\rho v_1^2 &= P_2 + \frac{1}{2}\rho \left(\frac{A_1^2}{A_2^2} \right) v_1^2 \\ P_1 - P_2 &= \frac{1}{2}\rho v_1^2 \left(\frac{A_1^2 - A_2^2}{A_2^2} \right) \dots\dots\dots (iii)\end{aligned}$$

BETA[®] Berita Fisika

Manometer merupakan alat yang digunakan untuk mengukur tekanan. Tekanan udara pertama kali diukur oleh Evangelista Torricelli menggunakan air raksa dalam tabung bejana. Torricelli mencatat bahwa air raksa yang menonjol adalah 76 cm. Karena itu tekanan udara 1 atm setara dengan 76 cmHg.

Pada venturimeter yang dilengkapi manometer berlaku rumus:

$$v_1 = A_2 \sqrt{\frac{2(\rho' - \rho)gh}{\rho(A_1^2 - A_2^2)}}$$

Adapun pada venturimeter tanpa manometer berlaku rumus:

$$v_1 = A_2 \sqrt{\frac{2gh}{(A_1^2 - A_2^2)}}$$

Berdasarkan persamaan tekanan hidrostatik, pada manometer berlaku:

$$P_A = P_1 + \rho gh_1$$

$$P_B = P_2 + \rho g(h_1 - h) + \rho' gh$$

Titik A dan B berada pada satu bidang mendatar, maka berlaku Hukum Pokok Hidrostatika.

$$P_A = P_B$$

$$P_1 + \rho gh_1 = P_2 + \rho g(h_1 - h) + \rho' gh$$

$$P_1 = P_2 - \rho gh + \rho' gh$$

$$P_1 - P_2 = \rho' gh - \rho gh$$

$$P_1 - P_2 = (\rho' - \rho)gh \dots\dots\dots (iv)$$

Dari persamaan (iii) dan (iv), diperoleh:

$$\frac{1}{2} \rho v_1^2 \left(\frac{A_1^2 - A_2^2}{A_2^2} \right) = (\rho' - \rho)gh$$

sehingga:

$$v_1 = A_2 \sqrt{\frac{2(\rho' - \rho)gh}{\rho(A_1^2 - A_2^2)}} \dots\dots\dots (7.17)$$

dengan:

v_1 = laju aliran fluida pada pipa besar (m/s)

A_1 = luas penampang pipa besar (m²)

A_2 = luas penampang pipa kecil (m²)

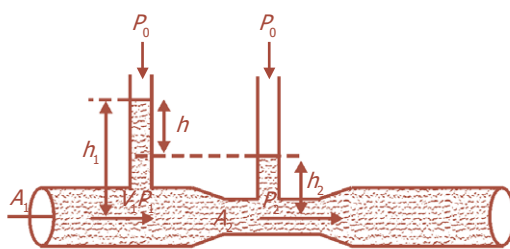
ρ = massa jenis fluida (kg/m³)

ρ' = massa jenis fluida dalam manometer (kg/m³)

h = selisih tinggi permukaan fluida pada manometer (m)

g = percepatan gravitasi (m/s²)

Untuk venturimeter yang tanpa dilengkapi manometer, pada prinsipnya sama, tabung manometer diganti dengan pipa pengukur beda tekanan seperti pada Gambar 7.29.



Gambar 7.29 Venturimeter tanpa dilengkapi manometer.

Berdasarkan persamaan tekanan hidrostatik, maka tekanan pada titik 1 dan 2 adalah:

$$P_1 = P_0 + \rho gh_1$$

$$P_2 = P_0 + \rho gh_2$$

Selisih tekanan pada kedua penampang adalah:

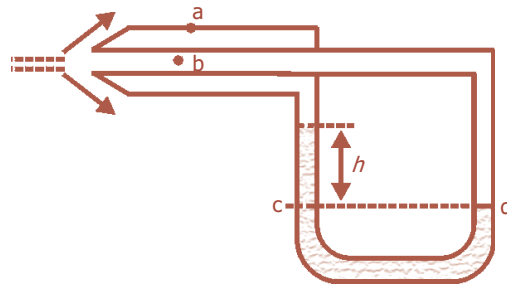
$$P_1 - P_2 = \rho g(h_1 - h_2) = \rho gh \dots\dots\dots (7.18)$$

Dengan menggabungkan persamaan di atas diperoleh:

$$v_1 = A_2 \sqrt{\frac{2gh}{(A_1^2 - A_2^2)}} \dots\dots\dots (7.19)$$

c. Tabung Pitot

Tabung pitot digunakan untuk mengukur laju aliran gas. Gambar 7.30 menunjukkan sebuah tabung pitot. Sebagai contoh, udara mengalir di dekat lubang a. Lubang ini sejajar dengan arah aliran udara dan dipasang cukup jauh dari ujung tabung, sehingga kecepatan dan tekanan udara pada lubang tersebut mempunyai nilai seperti halnya aliran udara bebas.



Gambar 7.30 Tabung pitot dilengkapi manometer.

Tekanan pada kaki kiri manometer sama dengan tekanan dalam aliran gas, yaitu P_a . Lubang dari kaki kanan manometer tegak lurus terhadap aliran, sehingga kecepatan di titik b menjadi nol ($v_b = 0$). Pada titik tersebut gas dalam keadaan diam, dengan tekanan P_b dan menerapkan Hukum Bernoulli di titik a dan b, maka:

$$P_a + \frac{1}{2}\rho v_a^2 + \rho g h_a = P_b + \frac{1}{2}\rho v_b^2 + \rho g h_b$$

Karena $v_b = 0$, dengan menganggap $h_a = h_b$, diperoleh:

$$P_a + \frac{1}{2}\rho v^2 = P_b \dots\dots\dots (i)$$

Pada manometer yang berisi zat cair dengan massa jenis ρ' , maka titik c dan d berada pada satu bidang mendatar, sehingga:

$$P_c = P_d$$

$$P_a + \rho' g h = P_d$$

Karena pada $P_d = P_b$, maka:

$$P_a + \rho' g h = P_b \dots\dots\dots (ii)$$

Dengan menggabungkan persamaan (i) dan (ii), diperoleh:

$$P_a + \frac{1}{2}\rho v^2 = P_a + \rho' g h$$

$$v = \sqrt{\frac{2 \cdot g \cdot h \cdot \rho'}{\rho}} \dots\dots\dots (7.20)$$

dengan:

v = laju aliran gas (m/s)

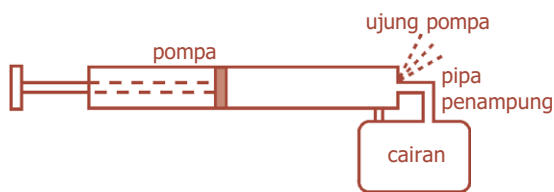
ρ = massa jenis gas (kg/m^3)

ρ' = massa jenis zat cair dalam manometer (kg/m^3)

h = selisih tinggi permukaan zat cair dalam manometer (m)

g = percepatan gravitasi (m/s^2)

d. Alat Penyemprot



Gambar 7.31 Alat penyemprot menerapkan Hukum Bernoulli.

cairan dalam penampung. Karena perbedaan tekanan ini cairan akan bergerak naik dan tersembur keluar dalam bentuk kabut bersama semburan udara pada ujung pompa.

Apabila pengisap ditekan, udara keluar dengan cepat melalui lubang sempit pada ujung pompa. Berdasarkan Hukum Bernoulli, pada tempat yang kecepatannya besar, tekanannya akan mengecil. Akibatnya, tekanan udara pada bagian atas penampung lebih kecil daripada tekanan udara pada permukaan

e. Gaya Angkat Sayap Pesawat Terbang



Sumber: *Tempo*, Januari 2006

Gambar 7.32 Pesawat terbang menggunakan prinsip Bernoulli agar bisa terbang.

Penampang sayap pesawat terbang mempunyai bagian belakang yang tajam dan sisi bagian atas lebih melengkung daripada sisi bagian bawah. Bentuk ini membuat kecepatan aliran udara melalui sisi bagian atas pesawat v_1 lebih besar daripada kecepatan aliran udara di bagian bawah sayap v_2 . Sesuai Hukum Bernoulli, pada tempat yang mempunyai kecepatan lebih tinggi tekanannya akan lebih rendah. Misalnya, tekanan udara di atas sayap adalah P_1 dan tekanan udara di bawah sayap pesawat sebesar P_2 , maka:

$$P_1 + \frac{1}{2}\rho v_1^2 = P_2 + \frac{1}{2}\rho v_2^2$$

$$P_1 - P_2 = \frac{1}{2}\rho(v_2^2 - v_1^2)$$

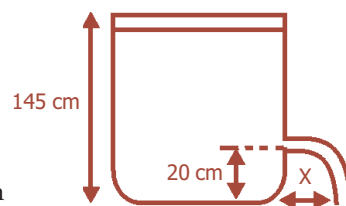
Karena $v_1 > v_2$, maka $P_1 < P_2$, selisih tekanan antara sisi atas dan bawah sayap inilah yang menimbulkan gaya angkat pada sayap pesawat. Jika luas penampang sayap pesawat adalah A , maka gaya angkat yang dihasilkan adalah:

$$F = P.A$$

$$F = (P_2 - P_1). A = \frac{1}{2}\rho.A(v_1^2 - v_2^2) \dots\dots\dots (7.21)$$

Contoh Soal

1. Suatu bejana berisi air seperti tampak pada gambar. Tinggi permukaan zat cair 145 cm dan lubang kecil pada bejana 20 cm dari dasar bejana. Jika $g = 10 \text{ m/s}^2$, tentukan:
 - a. kecepatan aliran air melalui lubang,
 - b. jarak pancaran air yang pertama kali jatuh diukur dari dinding bejana!



Penyelesaian:

Diketahui: $h_2 = 145 \text{ cm} = 1,45 \text{ m}$ $g = 10 \text{ m/s}^2$
 $h_1 = 20 \text{ cm} = 0,2 \text{ m}$

Ditanya: a. $v_1 = \dots ?$
b. $x_1 = \dots ?$

Jawab:

a. $v_1 = \sqrt{2g(h_1 - h_2)} = \sqrt{2 \times 10(1,45 - 0,2)} = 5 \text{ m/s}$

b. Jarak pancaran air

$$h = \frac{1}{2}gt^2$$

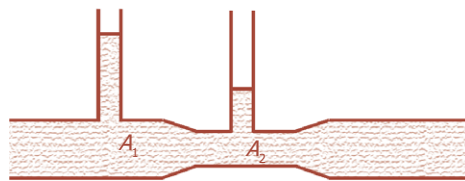
$$0,2 = \frac{1}{2} \times 10 \times t^2$$

$$t = 0,2 \text{ sekon}$$

$$x = v_1 \cdot t$$

$$= 5 \times 0,2 = 1 \text{ m}$$

2. Air mengalir melewati venturimeter seperti pada gambar. Jika luas penampang A_1 dan A_2 masing-masing 5 cm^2 dan 4 cm^2 , dan $g = 10 \text{ m/s}^2$, tentukan kecepatan air (v_1) yang memasuki pipa venturimeter!



Penyelesaian:

Diketahui: $A_1 = 5 \text{ cm}^2$

$$A_2 = 4 \text{ cm}^2$$

$$g = 10 \text{ m/s}^2$$

Ditanya: $v_1 = \dots ?$

Jawab:

Pada pipa horizontal berlaku:

$$P_1 - P_2 = \frac{1}{2}(\rho v_1^2 - \rho v_2^2)$$

$$A_1 \cdot v_1 = A_2 \cdot v_2$$

$$v_2 = \frac{A_1 \cdot v_1}{A_2}$$

$$= \frac{5}{4}v_1$$

Pada pipa vertikal berlaku: $P_1 - P_2 = \rho \cdot g \cdot h$, sehingga:

$$\frac{1}{2}\rho(v_2^2 - v_1^2) = \rho \cdot g \cdot h$$

$$\left(\frac{5}{4}v_1\right)^2 - v_1^2 = 2 \times 10 \times 0,45$$

$$\frac{25}{16}v_1^2 - v_1^2 = 9$$

$$\frac{9}{16}v_1^2 = 9$$

$$v_1 = 4 \text{ m/s}$$

3. Sebuah pipa silindris dengan diameter berbeda masing-masing 8 cm dan 4 cm diletakkan pada bidang mendatar. Jika kecepatan aliran air pada diameter besar 2 m/s dan tekanannya 10^5 Pa, berapakah kecepatan dan tekanan air pada diameter kecil?

Penyelesaian:

Diketahui: $d_1 = 8 \text{ cm}$
 $d_2 = 4 \text{ cm}$
 $v_1 = 2 \text{ m/s}$
 $P_1 = 10^5 \text{ Pa}$

Ditanya: $v_2 = \dots ?$
 $P_2 = \dots ?$

Jawab:

$A_1 \cdot v_1 = A_2 \cdot v_2$ karena $A = \frac{1}{4} \pi d^2$, maka:

$d_1^2 \cdot v_1 = d_2^2 \cdot v_2$

$v_2 = \frac{d_1^2}{d_2^2} \cdot v_1 = \left(\frac{d_1}{d_2} \right)^2 \cdot v_1$

$v_2 = \left(\frac{0,08}{0,04} \right)^2 \times 2$

$v_2 = 8 \text{ m/s}$

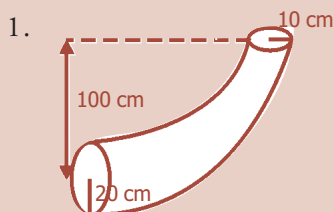
Berdasarkan Hukum Bernoulli untuk $h_1 = h_2$, maka:

$P_1 + \frac{1}{2} \rho v_1^2 = P_2 + \frac{1}{2} \rho v_2^2$

$(10^5) + (2 \times 10^3) = P_2 + (32 \times 10^3)$

$P_2 = 10^5 - (0,3 \times 10^5)$
 $= 0,7 \times 10^5 \text{ Pa}$

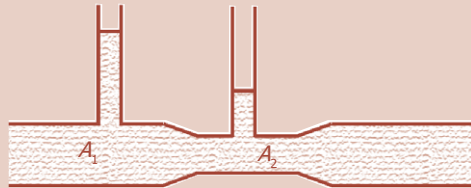
Uji Kemampuan 7.4



Air mengalir ke atas melalui pipa seperti ditunjukkan gambar di samping dengan debit $10 \text{ dm}^3/\text{s}$. Jika tekanan pada ujung bawah adalah 90 kPa dan $g = 10 \text{ m/s}^2$, tentukan:

- kelajuan air pada kedua ujung pipa,
- tekanan pada ujung atas pipa!

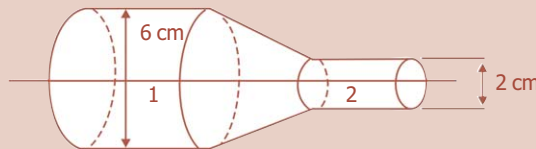
2.



Air mengalir dalam venturimeter seperti ditunjukkan gambar di atas. Kelajuan air pada penampang 2 adalah 6 m/s. Jika $g = 10 \text{ m/s}^2$ dan $h = 20 \text{ cm}$, berapakah kelajuan air pada penampang 1?

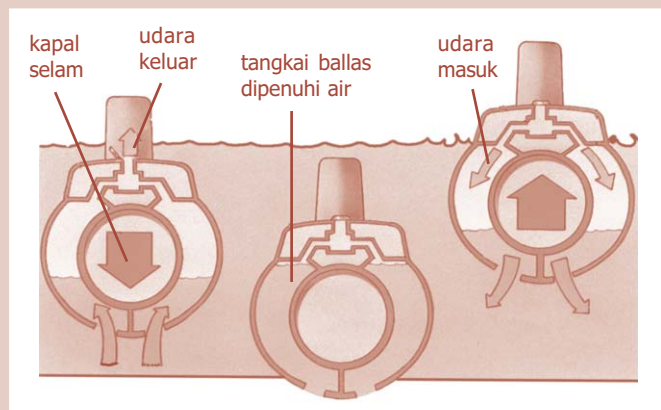
3. Hitunglah daya yang dikeluarkan jantung, jika dalam setiap detak jantung, jantung memompa 750 mL darah dengan tekanan rata-rata 100 mmHg! Asumsikan 65 detak jantung per menit.

4.



Sebuah pipa horizontal mengalami pengecilan seperti tampak pada gambar. Pada titik 1 diameter adalah 6 cm, sementara titik 2 diameter hanyalah 2 cm. Pada titik 1, $v_1 = 2 \text{ m/s}$ dan $P_1 = 180 \text{ kPa}$. Hitunglah v_2 dan P_2 !

Percikan Fisika



Kapal Selam

Kapal selam terdiri atas kompartemen kedap udara yang dikelilingi oleh beberapa tangki ballas. Kapal selam dapat menyelam dengan cara mengisi tangki-tangki ini dengan air. Ketika menyelam, gaya apungan alami membuat kapal dalam posisi melayang, tidak mengapung atau tenggelam. Kapal dapat naik ke permukaan air dengan cara memampatkan udara untuk memaksa air keluar dari tangki.

Fiesta

Fisikawan Kita



Blaise Pascal (1623 - 1662)

Ia seorang ahli matematika, fisika, dan filsafat terkenal berkebangsaan Prancis. Ia lahir pada tanggal 19 Juni 1623 di Clermont Ferrand, Prancis dan meninggal pada tanggal 19 Agustus 1662.

Penemuan Pascal yang penting, antara lain Hukum Pascal, segitiga Pascal, dan kalkulator digital. Ayahnya Etienne Pascal adalah seorang hakim yang sangat terpelajar dan bekerja di pengadilan pajak. Dalam bidang fisika ia menemukan Hukum Pascal yang menyatakan bahwa tekanan yang diberikan pada fluida dalam ruang tertutup akan diteruskan ke segala arah dengan sama besar.

Kilas Balik

- * Fluida adalah zat yang dapat mengalir, yaitu zat cair dan gas.
- * Tekanan didefinisikan sebagai gaya tiap satuan luas.

$$P = \frac{F}{A}$$

- * Tekanan hidrostatis adalah tekanan yang dilakukan oleh zat cair yang disebabkan oleh berat zat cair itu sendiri, dirumuskan:

$$P = \rho gh$$

- * Hukum Pokok Hidrostatika menyatakan bahwa tekanan hidrostatis di semua titik yang terletak pada satu bidang mendatar di dalam satu jenis zat cair besarnya sama.
- * Hukum Pascal menyatakan bahwa tekanan yang diberikan pada zat cair dalam ruang tertutup akan diteruskan ke segala arah sama besar.

$$P_1 = P_2$$

$$\frac{F_1}{A_1} = \frac{F_2}{A_2}$$

- * Hukum Archimedes menyatakan bahwa sebuah benda yang tercelup sebagian atau seluruhnya di dalam fluida mengalami gaya ke atas yang besarnya sama dengan berat fluida yang dipindahkan.
- * Gaya ke atas (gaya Archimedes) adalah gaya yang diberikan oleh fluida pada benda yang tercelup sebagian atau seluruhnya dalam fluida, dirumuskan:

$$F_A = \rho g V$$

- ✱ Apabila benda padat dicelupkan dalam zat cair, kemungkinan akan tenggelam, melayang, atau terapung.
 - tenggelam jika $w_b > F_A$, $\rho_b > \rho_f$
 - melayang jika $w_b = F_A$, $\rho_b = \rho_f$
 - terapung jika $w_b < F_A$, $\rho_b < \rho_f$
- ✱ Tegangan permukaan adalah kecenderungan permukaan zat cair untuk menegang sehingga tampak seperti kulit yang tegang (elastis). Tegangan permukaan (γ) didefinisikan sebagai besarnya gaya (F) yang dialami oleh tiap satuan panjang pada permukaan zat cair (ℓ).
- ✱ Kohesi adalah gaya tarik-menarik antara partikel sejenis, sedangkan adhesi adalah gaya tarik-menarik antara partikel yang tak sejenis.
- ✱ Permukaan zat cair dalam tabung berbentuk meniskus cekung karena adhesi lebih besar daripada kohesi dengan sudut kontak lancip ($\theta < 90^\circ$). Permukaan air raksa berbentuk meniskus cembung karena kohesi lebih besar daripada adhesi dengan sudut kontak tumpul ($\theta > 90^\circ$).
- ✱ Gejala kapilaritas adalah gejala naik atau turunnya permukaan zat cair dalam pipa kapiler. Besarnya kenaikan atau penurunan permukaan zat cair dirumuskan:

$$y = \frac{2\gamma \cos \theta}{\rho g r}$$
- ✱ Viskositas adalah ukuran kekentalan zat cair. Besarnya gaya gesek dalam zat cair dinyatakan dalam Hukum Stokes. Untuk benda berbentuk bola dirumuskan:

$$F_s = 6\pi\eta r v$$
 Besarnya koefisien viskositas (η) dirumuskan:

$$\eta = \frac{2r^2 g}{9v} (\rho_b - \rho_f)$$
- ✱ Persamaan kontinuitas menyatakan bahwa pada fluida tak kompresibel dan tunak kecepatan aliran fluida berbanding terbalik dengan luas penampangnya.

$$A_1 \cdot v_1 = A_2 \cdot v_2$$
- ✱ Debit adalah banyaknya fluida yang mengalir melalui suatu penampang tiap satuan waktu.

$$Q = \frac{V}{t} = A \cdot v$$
- ✱ Hukum Bernoulli menyatakan bahwa di setiap titik pada fluida yang bergerak, jumlah tekanan, energi kinetik, dan energi potensial besarnya tetap.

$$P + \frac{1}{2}\rho v^2 + \rho g h = \text{konstan}$$

$$P_1 + \frac{1}{2}\rho v_1^2 + \rho g h_1 = P_2 + \frac{1}{2}\rho v_2^2 + \rho g h_2$$

- ※ Teori Torricelli menyatakan bahwa kecepatan aliran zat cair pada lubang sama dengan kecepatan benda yang jatuh bebas dari ketinggian yang sama.

$$v = \sqrt{2gh}$$

- ※ Venturimeter adalah alat yang digunakan untuk mengukur laju aliran zat cair dalam pipa. Untuk venturimeter yang dilengkapi manometer, besarnya kecepatan aliran zat cair pada pipa besar (v_1) dirumuskan:

$$v_1 = A_2 \sqrt{\frac{2(\rho' - \rho)gh}{\rho(A_1^2 - A_2^2)}}$$

Untuk venturimeter tanpa manometer berlaku:

$$P_1 - P_2 = \frac{1}{2}\rho(v_2^2 - v_1^2)$$

$$P_1 - P_2 = \rho gh$$

$$v_1 = A_2 \sqrt{\frac{2gh}{(A_1^2 - A_2^2)}}$$

- ※ Tabut pitot digunakan untuk mengukur laju aliran gas.

$$\frac{1}{2}\rho v^2 = \rho' gh$$

$$v = \sqrt{\frac{2gh\rho'}{\rho}}$$

- ※ Penerapan Hukum Bernoulli yang lain adalah pada alat penyemprot (serangga, parfum), dan gaya angkat pada sayap pesawat terbang.

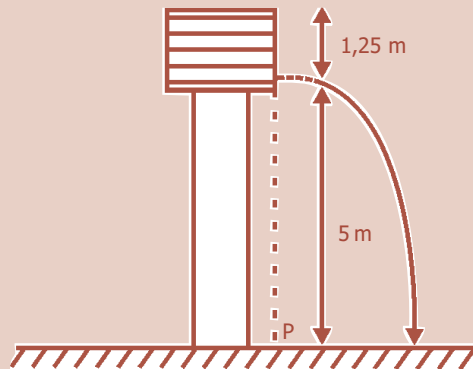
Uji Kompetensi

A. Pilihlah jawaban yang paling tepat!

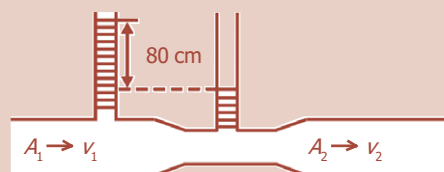
- Dimensi tekanan jika dinyatakan dalam dimensi-dimensi pokok L, M, dan T adalah
 - MLT^2
 - $ML^{-1}T$
 - MLT^{-1}
 - $ML^{-1}T^{-2}$
 - MLT^{-2}
- Tekanan mutlak pada kedalaman 50 meter di bawah permukaan danau adalah
(massa jenis air danau 1 g/cm^3 , $g = 10 \text{ m/s}^2$, dan tekanan atmosfer $= 10^5 \text{ Pa}$)
 - $1 \times 10^5 \text{ N/m}^2$
 - $4 \times 10^5 \text{ N/m}^2$
 - $5 \times 10^5 \text{ N/m}^2$
 - $6 \times 10^5 \text{ N/m}^2$
 - $7,5 \times 10^5 \text{ N/m}^2$

3. Sebuah pompa hidrolik dengan perbandingan diameter pengisap 1 : 20. Apabila pada pengisap besar digunakan untuk mengangkat beban 16.000 N, maka besar gaya minimal yang dikerjakan pada pengisap kecil adalah
 - a. 20 N
 - b. 40 N
 - c. 50 N
 - d. 80 N
 - e. 800 N
4. Sebuah balok kayu yang volumenya 10^{-4} m^3 muncul 0,6 bagian ketika dimasukkan ke dalam air yang mempunyai massa jenis 10^3 kg/m^3 . Jika $g = 10 \text{ m/s}^2$, besar gaya ke atas yang dialami benda adalah
 - a. $4 \times 10^{-2} \text{ N}$
 - b. $4 \times 10^{-1} \text{ N}$
 - c. $1 \times 10^5 \text{ N}$
 - d. $4 \times 10^5 \text{ N}$
 - e. $5 \times 10^5 \text{ N}$
5. Seekor nyamuk dapat hinggap di atas permukaan air karena
 - a. berat nyamuk lebih kecil daripada gaya Archimedes
 - b. massa jenis nyamuk sama dengan massa jenis air
 - c. massa jenis nyamuk lebih kecil daripada massa jenis air
 - d. adanya adhesi dan kohesi
 - e. adanya tegangan permukaan
6. Bila kita berdiri dekat rel dan kebetulan lewat serangkaian kereta api cepat, maka kita
 - a. merasa ditarik menuju rel
 - b. merasa didorong menjauhi rel
 - c. kadang-kadang merasa ditarik
 - d. ditarik atau didorong bergantung pada kecepatan kereta api
 - e. tidak merasa apa-apa
7. Air mengalir pada suatu pipa yang diameternya berbeda dengan perbandingan 1 : 2. Jika kecepatan air yang mengalir pada bagian pipa yang besar 40 m/s, maka besarnya kecepatan air pada bagian pipa yang kecil sebesar
 - a. 20 m/s
 - b. 40 m/s
 - c. 80 m/s
 - d. 120 m/s
 - e. 160 m/s

8. Gambar berikut menunjukkan reservoir penuh air yang dinding bagian bawahnya bocor, hingga air memancar sampai di tanah. Jika $g = 10 \text{ m/s}^2$, jarak pancar maksimum diukur dari P adalah



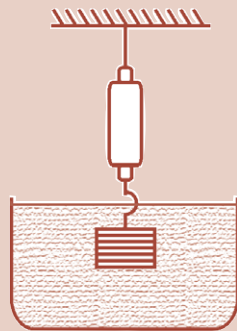
- 5 m
 - 10 m
 - 15 m
 - 20 m
 - 25 m
9. Sebuah pipa silindris memiliki dua macam penampang pipa diletakkan horizontal dan mengalir dari penampang besar dengan tekanan $1,4 \times 10^5 \text{ Nm}^2$ dan kelajuan 1 m/s. Jika diameter penampang besar 12 cm, maka diameter penampang kecil agar tekanannya sama dengan $1 \times 10^5 \text{ N/m}^2$ adalah
- 1 cm
 - 2 cm
 - 4 cm
 - 6 cm
 - 9 cm
10. Air mengalir dalam venturimeter seperti tampak pada gambar. Jika luas penampang A_1 dan A_2 masing-masing 5 cm^2 dan 3 cm^2 , maka kecepatan air (v_1) yang masuk venturimeter adalah



- 3 m/s
- 4 m/s
- 5 m/s
- 9 m/s
- 25 m/s

B. Jawablah dengan singkat dan benar!

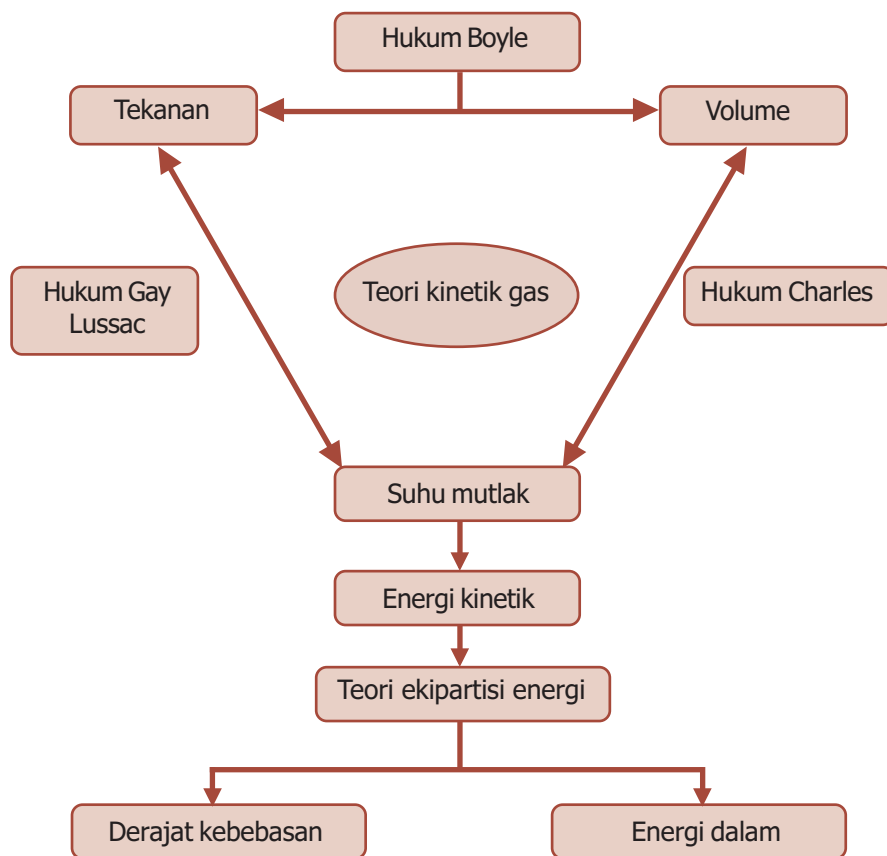
1. Sebuah balok kayu yang tingginya 20 cm dan massa jenis $0,8 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ mengapung pada air yang massa jenisnya 1.000 kg/m^3 . Berapakah tinggi balok yang muncul di permukaan cairan?
2. Sebuah benda massa 1 kg, massa jenisnya 4.000 kg/m^3 digantungkan pada neraca pegas, kemudian dimasukkan ke dalam minyak yang massa jenisnya 800 kg/m^3 . Jika diketahui $g = 10 \text{ m/s}^2$, berapa skala yang ditunjukkan oleh neraca pegas?



3. Sebuah pipa besar mempunyai luas penampang 6 cm^2 ujungnya mempunyai kran dengan luas penampang 2 cm^2 . Jika kecepatan air pipa besar $0,2 \text{ m/s}$, tentukan volume air yang keluar dari kran selama 10 menit!
4. Jelaskan terjadinya tegangan permukaan berdasarkan gaya tarik-menarik antarpartikel sejenis!
5. Pipa venturi dialiri air dengan debit 2 liter/s. Luas penampang $A_1 = 25 \text{ cm}^2$, dan $A_2 = 5 \text{ cm}^2$. Jika massa jenis air 1 g/cm^3 , massa jenis air raksa $13,6 \text{ g/cm}^3$, dan percepatan gravitasi $= 10 \text{ m/s}^2$, maka hitunglah:
 - a. kecepatan aliran air pada penampang 1 dan 2,
 - b. beda tekanan di titik 1 dan 2, dan
 - c. selisih permukaan air raksa pada manometer!

PETA KONSEP

Bab 8 Teori Kinetik Gas



BAB

8

TEORI KINETIK GAS



- Balon udara diisi gas helium sehingga dapat melayang.

Sumber: *Forum*, 11 Agustus 1997

Pernahkah kalian melihat balon udara? Atau perhatikan gambar di atas. Bagaimana balon udara dapat melayang-layang di udara? Balon udara diisi gas helium yang memiliki sifat-sifat tertentu sehingga balon bisa melayang. Gas helium termasuk gas monoatomik atau gas mulia yang beratom tunggal. Berikut ini akan kalian pelajari teori kinetik gas khususnya gas monoatomik.

Kata Kunci

gas ideal,
gas monoatomik,
Hukum Boyle,
Hukum Gay Lussac,
Hukum Charles,
suhu mutlak, tekanan,
volume



Sumber: *Ensiklopedi Sains dan Kehidupan*, CV Tarity Samudra Berlian, 2003

Gambar 8.1 Bohlam listrik diisi dengan gas argon.

BETA^B Berita Fisika

Joseph Gay Lussac adalah ahli kimia dari Prancis. Ia mengemukakan sifat-sifat gas, perbandingan sederhana dari volume gas yang bereaksi, logam alkali, gas halogen, Hukum perbandingan volume gas/ Hukum Gay Lussac.

Sebagaimana telah diketahui bahwa gas terdiri dari partikel-partikel yang tersusun tidak teratur. Jarak antarpartikel relatif jauh sehingga gaya tarik antarpartikel sangat lemah. Partikel-partikel selalu bergerak dengan laju tinggi memenuhi tempatnya, sehingga pada saat terjadi tumbukan antarpartikel, gaya tarik tidak cukup kuat untuk menjaga partikel-partikelnya tetap dalam satu kesatuan. Teori kinetik muncul dengan anggapan bahwa partikel-partikel gas selalu bergerak terus-menerus.

Gas yang tersusun atas satu unsur atom disebut **gas monoatomik**. Semua unsur gas mulia (golongan VIII) merupakan gas monoatomik, yaitu helium (He), neon (Ne), radon (Rn), argon (Ar), kripton (Kr), dan xenon (Xe). Helium dengan $A_r = 4$, digunakan dalam kapal, balon udara, dan penyelam. Neon dengan $A_r = 20$, digunakan untuk papan reklame neon dan cahaya fluoresen. Radon dengan $A_r = 222$, terbentuk dari hasil peluruhan radioaktif radium. Argon dengan $A_r = 40$, digunakan pada bohlam listrik dan tabung fluoresen. Kripton dengan $A_r = 84$, digunakan pada beberapa tabung laser, fluoresen, dan di dalam cahaya stroboskopik bandara. Xenon dengan $A_r = 131$, digunakan untuk mengisi tabung fluoresen dan bohlam.

Pada bab ini, pembahasan dibatasi pada gas ideal, yaitu gas yang mempunyai sifat-sifat yang sama pada kondisi yang sama. Dalam kondisi riil, gas yang berada pada tekanan rendah dan jauh dari titik cair, dianggap mempunyai sifat-sifat seperti gas ideal. Persamaan-persamaan tentang gas ideal adalah Hukum Boyle, Hukum Gay Lussac, Hukum Boyle-Gay Lussac, dan persamaan gas ideal. Kita juga akan membahas mengenai tekanan, suhu, dan energi kinetik yang dikaitkan dengan tingkah laku partikel gas. Dalam pembahasannya, tidak mungkin melakukan perhitungan untuk setiap partikel, melainkan sifat gas secara keseluruhan sebagai hasil rata-rata dari partikel-partikel penyusun gas.

Gas ideal adalah gas yang memenuhi anggapan-anggapan berikut ini.

1. Gas terdiri atas partikel-partikel yang jumlahnya sangat banyak.
2. Partikel-partikel gas bergerak dengan laju dan arah yang beraneka ragam, serta memenuhi Hukum Gerak Newton.

3. Partikel gas tersebar merata pada seluruh bagian ruangan yang ditempati.
4. Tidak ada gaya interaksi antarpartikel, kecuali ketika partikel bertumbukan.
5. Tumbukan yang terjadi antarpartikel atau antara partikel dengan dinding wadah adalah lenting sempurna.
6. Ukuran partikel sangat kecil dibandingkan jarak antara partikel, sehingga bersama-sama volumenya dapat diabaikan terhadap volume ruang yang ditempati.

Percikan Fisika



Bintang Buatan

Argon dan neon dapat mengeluarkan sinar berwarna terang jika arus listrik dilewatkan melalui tabung yang mengandung gas-gas tersebut dalam tekanan rendah. Helium, neon, dan argon dipakai dalam laser yang menghasilkan sinar dengan panjang gelombang tunggal secara kontinu. Laser gas mulia *starfire* menciptakan suatu gambar bintang buatan di atmosfer atas. Sebuah teleskop bintang kemudian mendeteksi perubahan gambar ini yang diakibatkan oleh kondisi atmosfer. Data ini dipakai komputer untuk menyesuaikan gambar dari bintang sesungguhnya untuk menghilangkan distorsi yang diakibatkan oleh kondisi atmosfer.



A. Hukum-Hukum tentang Gas

1. Hukum Boyle

Volume gas dalam suatu ruang tertutup sangat bergantung pada tekanan dan suhunya. Apabila suhu dijaga konstan, maka tekanan yang diberikan akan memperkecil volumenya. Hubungan, tersebut dikenal dengan **Hukum Boyle** yang dapat dinyatakan berikut ini.

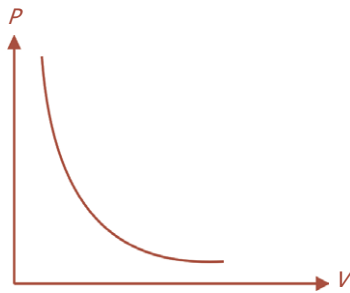
“Apabila suhu gas yang berada dalam ruang tertutup dijaga konstan, maka tekanan gas berbanding terbalik dengan volumenya”.

Secara sistematis, pernyataan tersebut dapat dituliskan:

$$P \propto \frac{1}{V}, \text{ untuk } P.V = \text{konstan atau}$$



Robert Boyle (1627 - 1691) seorang ahli filsafat berkebangsaan Irlandia. Ia lahir di Puri Lismore, Cork, Irlandia pada tanggal 25 Januari 1627 dan meninggal di London pada tanggal 30 Desember 1691.



Gambar 8.2 Grafik hubungan P - V pada suhu konstan.

$$P_1 \cdot V_1 = P_2 \cdot V_2 \dots\dots\dots (8.1)$$

dengan:

P_1 = tekanan gas pada keadaan 1 (N/m^2)

V_1 = volume gas pada keadaan 1 (m^3)

P_2 = tekanan gas pada keadaan 2 (N/m^2)

V_2 = volume gas pada keadaan 2 (m^3)

Persamaan (8.1) menyatakan bahwa pada suhu konstan, jika tekanan atau volume gas berubah, maka variabel yang lain juga berubah sehingga hasil kali PV selalu tetap.

Hubungan antara tekanan dan volume gas pada suhu konstan dapat dilukiskan dengan grafik seperti yang tampak pada Gambar 8.2. Grafik tersebut menunjukkan bahwa pada saat volumenya bertambah, tekanan gas akan berkurang. Proses pada suhu konstan disebut **proses isoteremis**.

BETA[®] Berita Fisika

Jacques Charles (1746 - 1823) menemukan sebuah hukum penting tentang pemuian gas jika dipanaskan. Pada tahun 1783 dia mengambil bagian dalam penerbangan perdana balon hidrogen.

2. Hukum Charles

Telah diketahui bahwa selain ditentukan oleh tekanan, volume gas dalam ruang tertutup juga dipengaruhi oleh suhu. Jika suhu gas dinaikkan, maka gerak partikel-partikel gas akan semakin cepat sehingga volumenya bertambah. Apabila tekanan tidak terlalu tinggi dan dijaga konstan, volume gas akan bertambah terhadap kenaikan suhu. Hubungan tersebut dikenal dengan Hukum Charles yang dapat dinyatakan berikut ini.

“Apabila tekanan gas yang berada dalam ruang tertutup dijaga konstan, maka volume gas berbanding lurus dengan suhu mutlaknya.”

Secara matematis, pernyataan tersebut dapat dituliskan:

$$V \propto T$$

$$\frac{V}{T} = \text{konstan atau } \frac{V_1}{T_1} = \frac{V_2}{T_2} \dots\dots\dots (8.2)$$

dengan:

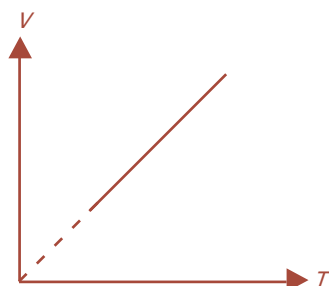
V_1 = volume gas pada keadaan 1 (m^3)

T_1 = suhu mutlak gas pada keadaan 1 (K)

V_2 = volume gas pada keadaan 2 (m^3)

T_2 = suhu mutlak gas pada keadaan 2 (K)

Hubungan antara volume gas dan suhu pada tekanan konstan dapat dilukiskan dengan grafik seperti yang tampak pada Gambar 8.3. Proses yang terjadi pada tekanan tetap disebut **proses isobaris**.



Gambar 8.3 Grafik hubungan V - T pada tekanan konstan.

3. Hukum Gay Lussac

Apabila botol dalam keadaan tertutup kita masukkan ke api, maka botol tersebut akan meledak. Hal ini terjadi karena naiknya tekanan gas di dalamnya akibat kenaikan suhu. Dengan demikian, dapat dikatakan bahwa:

“Apabila volume gas yang berada pada ruang tertutup dijaga konstan, maka tekanan gas berbanding lurus dengan suhu mutlaknya”.

Pernyataan tersebut dikenal dengan **Hukum Gay Lussac**. Secara matematis dapat dituliskan:

$$P \propto T$$

$$\frac{P}{T} = \text{konstan} \text{ atau } \frac{P_1}{T_1} = \frac{P_2}{T_2} \dots\dots\dots (8.3)$$

dengan:

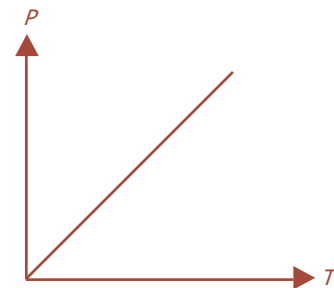
P_1 = tekanan gas pada keadaan 1 (N/m²)

T_1 = suhu mutlak gas pada keadaan 1 (K)

P_2 = tekanan gas pada keadaan 2 (N/m²)

T_2 = suhu mutlak gas pada keadaan 2 (K)

Hubungan antara tekanan dan suhu gas pada volume konstan dapat dilukiskan dengan grafik seperti yang tampak pada Gambar 8.4. Proses yang terjadi pada volume konstan disebut proses **isokhoris**.



Gambar 8.4 Grafik hubungan P - T pada volume konstan.

4. Hukum Boyle-Gay Lussac

Hukum Boyle-Gay Lussac merupakan gabungan dari persamaan (8.1), (8.2), dan (8.3), sehingga dapat dituliskan:

$$\frac{PV}{T} = \text{konstan}$$

$$\frac{P_1 V_1}{T_1} = \frac{P_2 V_2}{T_2} \dots\dots\dots (8.4)$$

5. Persamaan Umum Gas Ideal

Sebelum membahas lebih lanjut mengenai persamaan umum gas ideal, kita akan mendefinisikan dahulu beberapa istilah kimia yang berkaitan dengan gas ideal.

- a. Massa atom relatif (A_r), adalah perbandingan massa rata-rata sebuah atom suatu unsur terhadap $\frac{1}{12}$ kali massa sebuah atom $^{12}_6\text{C}$. Harga massa atom relatif bukanlah massa yang sebenarnya dari suatu atom, tetapi hanya merupakan harga perbandingan.

Contoh:

$$A_r \text{ H} = 1$$

$$A_r \text{ Ne} = 20$$

$$A_r \text{ Ar} = 4$$

BETA[®] Berita Fisika

Joseph Louis Gay Lussac (1778 - 1850), ia seorang ahli fisika dan kimia dari Prancis, lahir di St Leonard le Nobalt, Haute Vienne pada tanggal 6 Desember 1778. Ia adalah guru besar di Ecole Polytechnique, Sorbonne, dan Jardin des Plantes.

Komet

Kolom mengingat

Hukum Avogadro menyatakan untuk seluruh gas jika mempunyai volume, temperatur, dan tekanan yang sama, akan mempunyai jumlah molekul yang sama. Hukum ini hanya berlaku bagi gas ideal.

BETA[®] Berita Fisika

Temperatur pada gas ideal adalah $T = 273,16 \text{ K} \frac{P}{P_{tr}}$, dengan P_{tr} adalah tekanan gas pada titik tripel. Adapun temperatur pada gas riil adalah:

$$T = 273,16 \text{ K} \lim_{P_{tr} \rightarrow 0} \frac{P}{P_{tr}}$$

- Massa molekul relatif (M_r), adalah jumlah keseluruhan massa atom relatif (A_r) unsur-unsur penyusun senyawa.
- Mol (n), adalah satuan banyaknya partikel yang besarnya merupakan hasil bagi massa suatu unsur (senyawa) dengan massa relatifnya (A_r atau M_r).

$$n(\text{mol}) = \frac{\text{massa unsur atau senyawa (gram)}}{A_r (M_r)}$$

- Bilangan Avogadro, adalah bilangan yang menyatakan jumlah partikel dalam satu mol.

$$N_A = 6,023 \times 10^{23} \text{ partikel/mol}$$

$$N = n N_A$$

N adalah jumlah total partikel.

Hukum-hukum tentang gas dari Boyle, Charles, Gay Lussac, dan Boyle-Gay Lussac diperoleh dengan menjaga satu atau lebih variabel dalam keadaan konstan untuk mengetahui akibat dari perubahan satu variabel. Berdasarkan Hukum Boyle-Gay Lussac diperoleh:

$$\frac{PV}{T} = \text{konstan atau } \frac{PV}{T} = k.$$

Apabila jumlah partikel berubah, maka volume gas juga akan berubah. Hal ini berarti bahwa harga $\frac{PV}{T}$ adalah tetap, bergantung pada banyaknya partikel (N) yang terkandung dalam gas. Persamaan di atas dapat dituliskan:

$$\frac{PV}{T} = N \cdot k$$

$$PV = N \cdot k \cdot T \dots \dots \dots (i)$$

$$k = \text{konstanta Boltzmann, } (k = 1,38 \times 10^{-23} \text{ J/K})$$

Karena $N = n \cdot N_A$, maka:

$$PV = n \cdot N_A \cdot k \cdot T \dots \dots \dots (ii)$$

$N_A \cdot k = R$, yang merupakan konstanta gas umum yang besarnya sama untuk semua gas, maka persamaan (ii) menjadi:

$$PV = n \cdot R \cdot T \dots \dots \dots (8.5)$$

dengan:

P = tekanan gas (N/m^2)

V = volume gas (m^3)

n = jumlah mol

T = suhu mutlak (K)

R = konstanta gas umum (J/mol.K)

$$R = N_A \cdot k$$

$$R = (6,023 \times 10^{23}) (1,38 \times 10^{-23})$$

$$R = 8,31 \text{ J/mol.K} = 0,082 \text{ L.atm/mol.K}$$

Persamaan (8.5) disebut persamaan umum gas ideal.

Contoh Soal

1. Suatu gas ideal sebanyak 4 liter memiliki tekanan 1,5 atmosfer dan suhu 27 °C. Tentukan tekanan gas tersebut jika suhunya 47 °C dan volumenya 3,2 liter!

Penyelesaian:

Diketahui: $V_1 = 4$ liter

$V_2 = 3,2$ liter

$P_1 = 1,5$ atm

$T_1 = 27\text{ °C} = 27+273 = 300\text{ K}$

$T_2 = 47\text{ °C} = 47+273 = 320\text{ K}$

Ditanya: $P_2 = \dots ?$

Jawab:

$$\frac{P_1 \cdot V_1}{T_1} = \frac{P_2 \cdot V_2}{T_2}$$

$$\frac{1,5 \times 4}{300} = \frac{P_2 \times 3,2}{320}$$

$$\begin{aligned} P_2 &= \frac{1,5 \times 4 \times 320}{300 \times 3,2} \\ &= 2\text{ atm} \end{aligned}$$

2. Gas helium sebanyak 16 gram memiliki volume 5 liter dan tekanan 2×10^5 Pa. Jika $R = 8,31$ J/mol.K, berapakah suhu gas tersebut?

Penyelesaian:

Diketahui: $m = 16$ gram $= 16 \times 10^{-3}$ kg

$Mr\text{ O}_2 = 4$

$P = 2 \times 10^5$ Pa

$R = 8,31$ J/mol.K

$V = 5$ liter $= 5 \times 10^{-3}$ m³

Ditanya: $T = \dots ?$

Jawab:

$$n = \frac{m}{Mr}$$

$$= \frac{16 \times 10^{-3}}{4}$$

$$= 4 \times 10^{-3}\text{ mol}$$

$$P \cdot V = n \cdot R \cdot T$$

$$T = \frac{P \cdot V}{n \cdot R}$$

$$\begin{aligned} &= \frac{(2 \times 10^5)(5 \times 10^{-3})}{(4 \times 10^{-3})(8,31)} \\ &= 30.084\text{ K} \end{aligned}$$

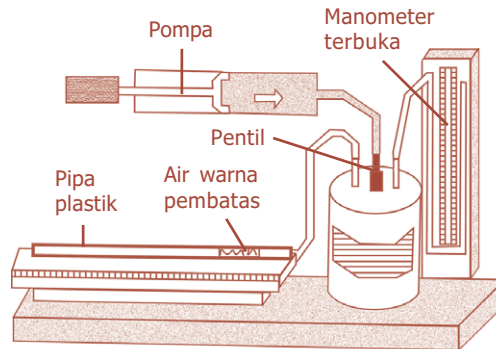
Kegiatan

Tujuan : Memahami Hukum Boyle.

Alat dan bahan : Pipa plastik, pentil, pompa, raksa, air, pewarna, pipa U.

Cara Kerja:

1. Susunlah alat dan bahan sesuai dengan gambar di samping.
2. Isilah pipa plastik kecil dengan sedikit air berwarna sebagai pembatas ruang, dan hubungkan dengan tangki.
3. Dalam kondisi pentil terbuka, isilah pipa U dengan raksa (sebagai manometer terbuka).



4. Tutuplah kembali pentil, permukaan raksa pada kedua kaki manometer mendatar.
5. Ukurlah volume ruang antara air berwarna sebagai pembatas sampai ujung pipa L , dan tentukan besar volume udara sepanjang L ini, yaitu $V = A.L$. Tekanan udara berdasarkan manometer adalah sama dengan tekanan udara luar yaitu B .
6. Pompa sedikit udara ke dalam tangki sampai terdapat sedikit ($h_1 = \pm 1$ cm) kenaikan raksa pada manometer. Volume udara pada ruang tertutup pada pipa kecil akan berkurang menjadi $V_1 = A.L_1$. Tekanan udara pada kondisi ini adalah $P_1 = B_1.h_1$.
7. Ulangilah langkah 5 untuk berbagai besar tekanan dalam ruang udara pada pipa kecil P_1 . Dalam hal ini volumenya menjadi V_1 .
8. Masukkan data $P_1.V_1$ dengan mengikuti format berikut ini.

L_1	$V_1 = L_1.A$	h_1	$P_1 = h_1 + B$	$P_1.V_1$

Diskusi:

1. Buatlah grafik P_1 kontra V_1 !
2. Apa yang dapat disimpulkan dari percobaan yang telah kalian lakukan?

Uji Kemampuan 8.1

1. Berapakah tekanan 20 mol gas yang berada dalam tangki yang volumenya 100 liter jika suhunya 77°C dan $g = 9,8 \text{ m/s}^2$?

- Sebelum berjalan, tekanan udara di dalam ban mobil adalah $4,2 \times 10^5$ Pa pada suhu 20°C . Jika setelah berjalan kurang lebih 1 jam, tekanan udara dalam ban menjadi $4,8 \times 10^5$ Pa, berapakah suhu udara sekarang? (Diketahui $R = 8,31$ J/mol.K)
- Sebuah balon gas (dianggap berbentuk bola) berdiameter 24 cm berisi gas helium. Pada suhu 22°C , tekanan mutlak di dalam balon adalah 1,2 atm. Jika $A_r \text{ He} = 4$ gram/mol, hitunglah massa helium yang diperlukan untuk memenuhi balon tersebut!



B. Teori Kinetik Gas

1. Tekanan Gas Ideal

Berdasarkan teori kinetik, kita akan menentukan secara kuantitatif tekanan dalam gas. Misalnya, suatu gas yang mengandung sejumlah partikel berada dalam suatu ruang yang berbentuk kubus dengan sisi L dan luas masing-masing sisinya A (Gambar 8.5). Tekanan yang diberikan gas pada dinding sama dengan besarnya momentum yang dilakukan oleh partikel gas tiap satuan luas tiap satuan waktu.

Partikel yang massanya m_0 bergerak dengan kecepatan v_x dalam arah sumbu x . Partikel menumbuk dinding sebelah kiri yang luasnya A dengan kecepatan $-v_x$. Karena tumbukan bersifat lenting sempurna, maka partikel akan terpantul dengan kecepatan v_x (Gambar 8.6). Perubahan momentum yang terjadi pada partikel gas X dirumuskan:

$$\begin{aligned}\Delta p &= p_2 - p_1 \\ &= m_0 \cdot v_x - (-m_0 v_x) \\ \Delta p &= 2m_0 \cdot v_x\end{aligned}$$

Partikel akan kembali menumbuk dinding yang sama setelah menempuh jarak $2L$, dengan selang waktu:

$$\Delta t = \frac{2L}{v_x}$$

Besarnya impuls yang dialami dinding saat tumbukan adalah:

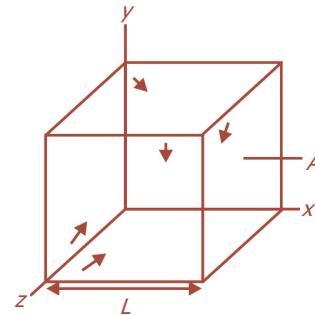
$$I = \Delta p$$

$$F \cdot \Delta t = \Delta p$$

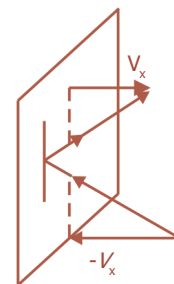
$$F \cdot \Delta t = 2m_0 v_x$$

$$F = \frac{2m_0 v_x}{\Delta t} = \frac{2m_0 v_x}{\frac{2L}{v_x}} = \frac{m_0 v_x^2}{L}$$

F adalah gaya yang dialami dinding pada saat tumbukan.



Gambar 8.5 Molekul gas bergerak pada tempat berbentuk kubus.



Gambar 8.6 Momentum molekul pada waktu terpantul dari dinding.

Komet
Kolom mengingat

Gas ideal adalah gas yang dianggap ideal, memiliki sifat tertentu, sehingga dapat diterapkan pada teori kinetik gas.

Besarnya tekanan gas dalam kubus adalah:

$$P = \frac{F}{A} = \frac{\frac{m_0 v_x^2}{L}}{L^2} = \frac{m_0 v_x^2}{L^3} = \frac{m_0 \cdot v_x^2}{V}$$

Apabila dalam wadah terdapat N partikel gas, maka tekanan gas pada dinding dirumuskan:

$$P = \frac{N \cdot m_0 \cdot \bar{v}_x^2}{V} \dots\dots\dots (8.6)$$

\bar{v}_x^2 adalah rata-rata kuadrat kecepatan partikel gas pada sumbu x .

$$\bar{v}_x^2 = \bar{v}_{1x}^2 + \bar{v}_{2x}^2 + \bar{v}_{3x}^2 + \dots + \bar{v}_{nx}^2$$

Partikel-partikel gas tersebut bergerak ke segala arah dengan laju yang tetap, sehingga:

$$\bar{v}_x^2 = \bar{v}_y^2 = \bar{v}_z^2$$

$$\bar{v}^2 = \bar{v}_x^2 + \bar{v}_y^2 + \bar{v}_z^2 = 3\bar{v}^2$$

$$\bar{v}_x^2 = \frac{1}{3} \bar{v}^2$$

Dengan demikian, persamaan (8.6) menjadi:

$$P = \frac{1}{3} \frac{N \cdot m_0 \cdot \bar{v}^2}{V} \dots\dots\dots (8.7)$$

dengan:

- P = tekanan gas (N/m²)
- N = jumlah partikel
- v = kecepatan (m/s)
- m_0 = massa partikel (kg)
- V = volume gas (m³)

Karena $\frac{1}{2} m_0 \cdot \bar{v}^2$ adalah energi kinetik rata-rata partikel dalam gas, maka persamaan (8.7) dapat dituliskan:

$$P = \frac{2}{3} \frac{N \cdot \overline{Ek}}{V} \dots\dots\dots (8.8)$$

Contoh Soal

Sebuah tangki yang volumenya 50 liter mengandung 3 mol gas monoatomik. Jika energi kinetik rata-rata yang dimiliki setiap gas adalah $8,2 \times 10^{-21}$ J, tentukan besar tekanan gas dalam tangki?

Penyelesaian:

$$\begin{aligned} \text{Diketahui: } V &= 50 \text{ liter} = 5 \times 10^{-2} \text{ m}^3 \\ n &= 3 \text{ mol} \\ Ek &= 8,2 \times 10^{-21} \text{ J} \end{aligned}$$

Ditanya: $P = \dots ?$

Jawab:

$$\begin{aligned} P &= \frac{2}{3} \frac{N \overline{Ek}}{V} \\ &= \frac{2}{3} \frac{n \cdot N_A \cdot Ek}{V} \\ &= \frac{2}{3} \frac{(3)(6,02 \times 10^{23})(8,2 \times 10^{-21})}{5 \times 10^{-2}} \\ &= 1,97 \times 10^5 \text{ N/m}^2 \end{aligned}$$

2. Suhu dan Energi Kinetik Rata-Rata Partikel Gas Ideal

Energi kinetik rata-rata partikel gas bergantung pada besarnya suhu. Berdasarkan teori kinetik, semakin tinggi suhunya, maka gerak partikel-partikel gas akan semakin cepat. Hubungan antara suhu dengan energi kinetik rata-rata partikel gas dinyatakan berikut ini.

Menurut persamaan umum gas ideal:

$$PV = N \cdot k \cdot T$$

$$P = \frac{N \cdot k \cdot T}{V}$$

Persamaan (8.8) menyatakan: $\frac{2}{3} \frac{N \cdot \overline{Ek}}{V}$

Dengan menyamakan kedua persamaan tersebut diperoleh:

$$\frac{N \cdot k \cdot T}{V} = \frac{2}{3} \frac{N \cdot \overline{Ek}}{V}$$

$$T = \frac{2}{3k} \overline{Ek} \text{ atau } \overline{Ek} = \frac{3}{2} k \cdot T \dots\dots\dots (8.9)$$

Persamaan (8.9) menyatakan bahwa energi kinetik rata-rata partikel gas sebanding dengan suhu mutlaknya.

3. Kelajuan Efektif Gas Ideal

Salah satu anggapan tentang gas ideal adalah bahwa partikel-partikel gas bergerak dengan laju dan arah yang beraneka ragam. Apabila di dalam suatu ruang tertutup terdapat N_1 partikel yang bergerak dengan kecepatan v_1 , N_2 partikel yang bergerak dengan kecepatan v_2 , dan seterusnya, maka rata-rata kuadrat kecepatan partikel gas \overline{v}^2 , dapat dituliskan:

$$\overline{v}^2 = \frac{N_1 \overline{v_1}^2 + N_2 \overline{v_2}^2 + \dots + N_i \overline{v_i}^2}{N_1 + N_2 + N_3} = \frac{\sum N_i \overline{v_i}^2}{\sum N_i} \dots\dots\dots (8.10)$$

Komet
Kolom mengingat

Energi kinetik translasi rata-rata dari molekul dalam gas berbanding lurus dengan temperatur mutlak. Hubungan ini merupakan salah satu kelebihan teori kinetik.

Ludwig Eduard Boltzmann sarjana fisika Austria, menyempurnakan teori kinetik gas dan memberikan dasar pada perkembangan mekanika statistik.

Akar dari rata-rata kuadrat kecepatan disebut kecepatan efektif gas atau v_{rms} (*rms = root mean square*).

$$v_{\text{rms}} = \sqrt{\bar{v}^2}$$

Mengingat $\overline{Ek} = \frac{1}{2}m_0 \cdot \bar{v}^2 = \frac{1}{2}m_0 \cdot v_{\text{rms}}^2$, maka apabila kita gabungkan dengan persamaan (8.9), diperoleh:

$$\frac{1}{2}m_0 \cdot \bar{v}^2 = \frac{3}{2}k \cdot T$$

$$v_{\text{rms}} = \sqrt{\frac{3k \cdot T}{m_0}} \dots\dots\dots (8.11)$$

dengan:

v_{rms} = kelajuan efektif gas (m/s)

T = suhu mutlak (K)

m_0 = massa sebuah partikel gas (kg)

k = konstanta Boltzmann (J/K)

Karena massa sebuah partikel adalah $m = n \cdot Mr = \frac{Mr}{N_A}$

dan $k = \frac{R}{N_A}$, maka persamaan (8.11) dapat dituliskan:

$$v_{\text{rms}} = \sqrt{\frac{3R \cdot T}{Mr}} \dots\dots\dots (8.12)$$

Berdasarkan persamaan umum gas ideal $k \cdot T = \frac{P \cdot V}{N}$, massa

total gas $m = N \cdot m_0$ dan $\rho = \frac{m}{V}$, maka persamaan (8.12)

$$\text{dapat dinyatakan: } v_{\text{rms}} = \sqrt{\frac{3P}{\rho}} \dots\dots\dots (8.13)$$

Contoh Soal

1. Jika konstanta Boltzmann $k = 1,38 \times 10^{-23}$ J/K, berapakah energi kinetik sebuah helium pada suhu 27 °C?

Penyelesaian:

Diketahui: $k = 1,38 \times 10^{-23}$ J/K

$T = 27 \text{ °C} = 27 + 273 = 300 \text{ K}$

Ditanya: $Ek = \dots ?$

Jawab:

$$Ek = \frac{3}{2}k \cdot T$$

$$= \frac{3}{2}(1,38 \times 10^{-23})(300) = 6,21 \times 10^{-21} \text{ J}$$

2. Di dalam ruang tertutup terdapat gas yang tekanannya $3,2 \times 10^5$ N/m². Jika massa jenis gas tersebut adalah 6 kg/m³, berapakah kecepatan efektif tiap partikel gas tersebut?

Penyelesaian:

Diketahui: $P = 3,2 \times 10^5$ N/m² $\rho = 6$ kg/m³

Ditanya: $Ek = \dots ?$

Jawab:

$$\begin{aligned} v_{\text{rms}} &= \sqrt{\frac{3P}{\rho}} \\ &= \sqrt{\frac{3(3,2 \times 10^5)}{6}} \\ &= 400 \text{ m/s} \end{aligned}$$

Uji Kemampuan 8.2

1. Suatu gas dalam ruang tertutup bersuhu 35°C . Berapakah suhu sekarang supaya energi kinetiknya menjadi $\frac{6}{5}$ kali semula?
2. Pada suhu berapakah kelajuan *root mean square* molekul gas neon sama dengan kelajuan *root mean square* molekul gas helium yang bersuhu 25°C ?



C. Teorema Ekipartisi Energi

Berdasarkan sifat gas ideal, partikel-partikel gas bergerak dengan laju dan arah yang beraneka ragam, sehingga sebuah partikel yang bergerak dengan kecepatan v dapat memiliki komponen kecepatan pada sumbu x , y dan sumbu z , yang besarnya:

$$\bar{v}^2 = \bar{v}_x^2 + \bar{v}_y^2 + \bar{v}_z^2 = 3\bar{v}^2$$

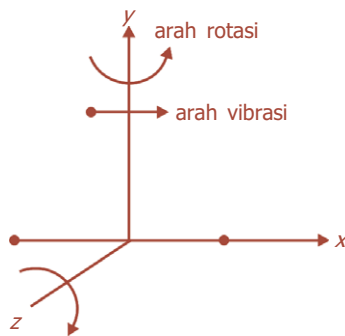
Energi kinetik partikel adalah:

$$Ek = \frac{1}{2}m\bar{v}^2 = \frac{1}{2}m(\bar{v}_x^2 + \bar{v}_y^2 + \bar{v}_z^2)$$

Hal ini berarti bahwa sebuah partikel dapat bergerak pada tiga arah yang berbeda. Energi kinetik rata-rata partikel dapat dihitung dengan menggunakan teorema ekipartisi energi, yang menyatakan bahwa: *“Jika pada suatu sistem yang mengikuti Hukum Newton tentang gerak dan mempunyai suhu mutlak T , maka setiap derajat kebebasan (f), suatu partikel memberikan kontribusi $\frac{1}{2}k.T$ pada energi rata-rata partikel,”* sehingga energi rata-rata dapat dituliskan:

$$\bar{E} = f\left(\frac{1}{2}k.T\right) \dots\dots\dots (8.14)$$

Setiap derajat kebebasan f memberikan kontribusi pada energi mekanik partikel tersebut.



Gambar 8.7 Translasi, rotasi, dan vibrasi molekul diatomik.

1. Derajat Kebebasan Molekul Gas

Pada gas ideal yang monoatomik atau beratom tunggal, partikel hanya melakukan gerak translasi pada arah sumbu x , sumbu y , dan sumbu z . Apabila massa partikel m , maka energi kinetik translasi sebesar:

$$Ek = \frac{1}{2}m.v^2 = \frac{1}{2}m.v_x^2 + \frac{1}{2}m.v_y^2 + \frac{1}{2}m.v_z^2$$

Dengan demikian, dikatakan bahwa gas monoatomik mempunyai tiga derajat kebebasan.

Pada bahasan ini hanya terbatas pada gas ideal monoatomik. Namun, sebagai pengayaan juga kita pelajari sedikit tentang gas diatomik. Pada gas diatomik atau beratom dua seperti H_2 , O_2 , dan N_2 , partikel-partikel gas selain melakukan gerak translasi juga terjadi gerak antaratom dalam molekul yang mengakibatkan partikel melakukan gerak rotasi dan vibrasi. Misalnya, kedua atom dalam satu molekul kita anggap berada pada sumbu x , seperti pada Gambar 8.7. Pada gambar tersebut, molekul gas diatomik dilukiskan dengan sebuah batang dengan dua buah beban pada kedua ujungnya. Pusat massa molekul melakukan gerak translasi pada arah sumbu x , y , dan z sehingga memiliki tiga derajat kebebasan. Molekul juga dapat melakukan gerak rotasi dengan energi kinetik $Ek = \frac{1}{2}I\omega^2$. Karena molekul benda pada arah sumbu x , maka momen inersia pada sumbu x adalah nol,

$$I_x = 0 \quad (Ek = \frac{1}{2}I_x.\omega^2 = 0).$$

Molekul hanya melakukan gerak rotasi terhadap sumbu y dan sumbu z . Ini berarti pada gerak rotasi, molekul mempunyai dua derajat kebebasan. Pada gerak vibrasi, molekul dapat memiliki energi kinetik dan energi potensial, sehingga mempunyai dua derajat kebebasan. Dengan demikian, sebuah molekul gas diatomik pada suhu tinggi yang memungkinkan molekul melakukan gerak translasi, rotasi, dan vibrasi dapat memiliki tujuh derajat kebebasan.

2. Energi Dalam pada Gas Ideal

Berdasarkan teorema ekipartisi energi bahwa tiap partikel gas mempunyai energi kinetik rata-rata sebesar $\overline{Ek} = f(\frac{1}{2}kT)$. Energi dalam suatu gas ideal didefinisikan sebagai jumlah energi kinetik seluruh molekul gas dalam ruang tertutup yang meliputi energi kinetik translasi,



Sumber: Dokumen Penerbit, 2006

Gambar 8.8 Papan reklame neon menggunakan gas neon yang menyimpan energi dalam.

rotasi, dan vibrasi. Apabila dalam suatu ruang terdapat N molekul gas, maka energi dalam gas ideal U dinyatakan:

$$U = N\bar{E} = Nf\left(\frac{1}{2}kT\right) \dots\dots\dots (8.15)$$

Berdasarkan derajat kebebasannya, energi dalam gas monoatomik ideal dapat dituliskan sebagai berikut:

$$f = 3$$

$$U = 3N\left(\frac{1}{2}kT\right) = \frac{3}{2}NkT \dots\dots\dots (8.16)$$

Contoh Soal

1. Berapakah tekanan dari 20 mol gas yang berada dalam tangki yang volumenya 100 liter jika suhunya 77 °C dan $g = 9,8 \text{ m/s}^2$? ($R = 8,31 \text{ J/mol.K}$)

Penyelesaian:

Diketahui: $n = 20 \text{ mol} = 0,02 \text{ Mol}$
 $V = 100 \text{ liter} = 0,1 \text{ m}^3$
 $T = 77 \text{ }^\circ\text{C} = 77 + 273 = 350 \text{ K}$
 $g = 9,8 \text{ m/s}^2$

Ditanya: $P = \dots ?$

Jawab:

$$PV = n.R.T$$

$$P = \frac{nRT}{V}$$

$$P = \frac{(0,02)(8,31)(350)}{0,1}$$

$$P = 581,7 \text{ N/m}^2 = 5,8 \times 10^2 \text{ N/m}^2$$

2. Berapakah energi dalam 4 mol gas monoatomik ideal pada suhu 107 °C, jika diketahui $k = 1,38 \times 10^{-23} \text{ J/K}$ dan $N_A = 6,02 \times 10^{26} \text{ molekul/kmol}$?

Penyelesaian:

Diketahui: $T = (273 + 107) \text{ K}$
 $= 380 \text{ K}$
 $\gamma = 3$

Ditanyakan: $U = \dots ?$

Jawab:

$$\bar{E}_k = \gamma\left(\frac{1}{2}kT\right)$$

$$= \frac{3}{2}kT$$

$$= \frac{3}{2}(1,38 \times 10^{-23})(380)$$

$$= 7,87 \times 10^{-21} \text{ J}$$

$$U = N.\bar{E}_k$$

$$= (4 \times 6,02 \times 10^{26})(7,87 \times 10^{-21})$$

$$= 1,90 \times 10^7 \text{ J}$$

Uji Kemampuan 8.3

1. Jika gas monoatomik dengan $k = 1,38 \times 10^{-22}$ J/K dan $N_A = 6,02 \times 10^{26}$ molekul/kmol, tentukan energi kinetik rata-rata dan energi dalam 4,8 mol gas ideal pada suhu 95 °C!
2. Tentukan rasio berikut ini untuk gas-gas hidrogen ($M_r = 2$ kg/mol) dan nitrogen ($M_r = 28$ kg/mol) pada temperatur yang sama:
 - a. energi kinetik hidrogen dan energi kinetik nitrogen,
 - b. laju *rms* hidrogen dan laju *rms* nitrogen!

Percikan Fisika



Menyebarnya Bau

Gas dapat mengalami difusi, yaitu dapat menyebar ke segala penjuru dan sepenuhnya mengisi wadah penampungnya. Inilah alasan mengapa bau wangi dari setetes parfum akan menyebar hingga memenuhi satu ruangan yang tertutup. Teori kinetik menyatakan bahwa partikel-partikel gas selalu bergerak dengan lintasan zig-zag karena saling bertumbukan yaitu satu sama lain dan dengan dinding wadah penampungnya. Tidak ada energi yang hilang selama proses tumbukan karena semua partikel gas sangat elastis.

Fiesta

Fisikawan Kita



Joseph Louis Gay Lussac (1778 - 1850)

Seorang ahli kimia dan fisika Prancis yang terkenal karena penelitiannya mengenai sifat-sifat gas dan perbandingan sederhana dari volume gas yang bereaksi, logam alkali, gas halogen, dan penentuan panas jenis gas. Gay Lussac lahir di Saint Leonard Prancis. Ayahnya seorang hakim pada masa pemerintahan Louis XVI. Ia lulus dari Ecole Polytechnique pada tahun 1800 dan melanjutkan studinya ke Ecole des Ponts et Chaussees, Paris, Prancis untuk memperdalam pengetahuannya di bidang mesin.

Penemuannya yang terpenting adalah Hukum Gay Lussac, yaitu hukum mengenai perbandingan volume gas. Hukum Gay Lussac menyatakan bahwa tekanan mutlak suatu gas pada volume konstan berbanding lurus dengan suhu mutlak gas tersebut.

- ※ Pada kondisi nyata, gas yang berada pada tekanan rendah dan jauh dari titik cair, dianggap memenuhi persamaan gas ideal.

$$P.V = N.k.T \text{ atau } P.V = n.R.T$$

k = konstanta Boltzmann

$$= 1,38 \times 10^{-23} \text{ J/K}$$

R = konstanta gas umum

$$= 8,31 \text{ J/mol.K}$$

$$= 0,082 \text{ L.atm/mol.K}$$

- ※ Tekanan gas dalam suatu wadah disebabkan oleh tumbukan partikel-partikel gas pada dinding wadahnya.

$$P = \frac{1}{3} \frac{N.m_0.\bar{v}^2}{V}$$

$$\text{atau } P = \frac{2}{3} \frac{N.\bar{Ek}}{V}$$

- ※ Energi kinetik rata-rata partikel gas sebanding dengan suhu mutlaknya.

$$\bar{Ek} = \frac{3}{2} k.T$$

- ※ Kelajuan efektif suatu partikel gas merupakan akar dari rata-rata kuadrat kecepatannya.

$$v_{\text{rms}} = \sqrt{\bar{v}^2} = \sqrt{\frac{3k.T}{m_0}}$$

$$\text{atau } v_{\text{rms}} = \sqrt{\frac{3R.T}{Mr}}$$

$$= \sqrt{\frac{3P}{\rho}}$$

- ※ Teorema ekipartisi energi menyatakan bahwa jika pada suatu sistem yang mengikuti Hukum Newton tentang gerak dan mempunyai suhu mutlak T , maka setiap derajat kebebasan (f) suatu partikel memberikan kontribusi $\frac{1}{2}kT$ pada energi rata-rata partikel.

$$\bar{E} = \bar{Ek} = f\left(\frac{1}{2}kT\right)$$

- ※ Energi dalam gas ideal adalah jumlah energi yang dimiliki molekul gas dalam suatu wadah tertentu.

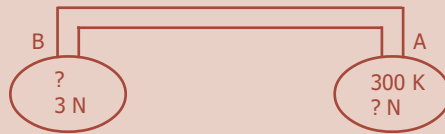
$$NE = Nf\left(\frac{1}{2}kT\right), \text{ dengan } f \text{ untuk gas monoatomik adalah } 3.$$

Uji Kompetensi

A. Pilihlah jawaban yang paling tepat!

1. Partikel-partikel gas ideal mempunyai sifat-sifat sebagai berikut, *kecuali*
 - a. selalu bergerak
 - b. tidak saling menarik
 - c. bertumbukan lenting sempurna
 - d. tersebar merata di seluruh bagian ruangan yang ditempati
 - e. tidak mengikuti Hukum Newton tentang gerak
2. Pada Hukum Boyle, $PV = k$, P adalah tekanan dan V adalah volume. Konstanta k mempunyai dimensi yang sama dengan
 - a. daya
 - b. usaha
 - c. momentum
 - d. suhu
 - e. konstanta pegas
3. Jika suatu gas ideal dimampatkan secara isotermis sampai volumenya menjadi setengahnya, maka
 - a. tekanan dan suhu tetap
 - b. tekanan menjadi dua kali lipat dan suhu tetap
 - c. tekanan tetap dan suhu menjadi dua kali
 - d. tekanan menjadi dua kali dan suhu menjadi setengahnya
 - e. tekanan dan suhu menjadi setengahnya
4. Diketahui volume tabung B dua kali volume tabung A. Keduanya terisi gas ideal. Volume tabung penghubung dapat diabaikan. Gas A berada pada suhu 300 K. Bila jumlah molekul dalam A adalah N dan jumlah molekul B adalah $3N$, maka suhu gas dalam tabung B adalah
 - a. 150 K
 - b. 200 K
 - c. 300 K
 - d. 450 K
 - e. 600 K
5. Suatu jenis gas mempunyai volume 100 cm^3 pada suhu 0°C dan tekanan 1 atm. Jika temperatur menjadi 50°C , sedangkan tekanan menjadi 2 atm, maka volume gas menjadi
 - a. $38,4 \text{ cm}^3$
 - b. $45,5 \text{ cm}^3$
 - c. $59,2 \text{ cm}^3$
 - d. $84,5 \text{ cm}^3$
 - e. $118,3 \text{ cm}^3$
6. Pada keadaan normal ($T = 0^\circ\text{C}$ dan $P = 1 \text{ atm}$) 5 gram gas argon ($A_r = 40$) mempunyai volume sebesar ($1 \text{ atm} = 10^5 \text{ N/m}^2$, $R = 8,314 \text{ J/K.mol}$)
 - a. $1,4 \times 10^{-6} \text{ m}^3$
 - b. $2,8 \times 10^{-3} \text{ m}^3$
 - c. $22,4 \times 10^{-3} \text{ m}^3$
 - d. 28 m^3
 - e. 224 m^3

7. Suatu gas ideal, dalam suatu ruang tertutup bersuhu 27°C . Untuk mengubah energi kinetik partikelnya menjadi $2 Ek$, suhu gas harus dijadikan
- 37°C
 - 45°C
 - 310°C
 - 327°C
 - 347°C
8. Sebanyak 4 gram gas neon dengan massa molekul 6 g/mol bersuhu 38°C . Jika tekanannya $1,8 \times 10^5 \text{ Pa}$, maka energi dalam gas adalah (Diketahui $k = 1,38 \times 10^{-23} \text{ J/K}$, $N_A = 6,02 \times 10^{23} \text{ molekul/mol}$).
- $2,58 \times 10^3 \text{ J}$
 - $3,12 \times 10^3 \text{ J}$
 - $3,85 \times 10^3 \text{ J}$
 - $4,23 \times 10^3 \text{ J}$
 - $5,16 \times 10^3 \text{ J}$
9. Jika suhu gas ideal dalam ruangan tertutup dinaikkan menjadi empat kali suhu semula, maka kecepatan gerak partikel-partikelnya menjadi
- $\frac{1}{4}$ kali
 - $\frac{1}{2}$ kali
 - 2 kali
 - 4 kali
 - 16 kali
10. Tangki berisi gas mula-mula bersuhu 200 K dipanasi hingga bersuhu 300 K. Jika jumlah partikel gas mula-mula 2 mol, maka agar energi dalam tidak berubah, kran harus dibuka sekejap hingga sebagian partikel gas keluar sejumlah
- $\frac{1}{2}$ mol
 - $\frac{1}{3}$ mol
 - $\frac{1}{4}$ mol
 - $\frac{2}{3}$ mol
 - $\frac{3}{4}$ mol

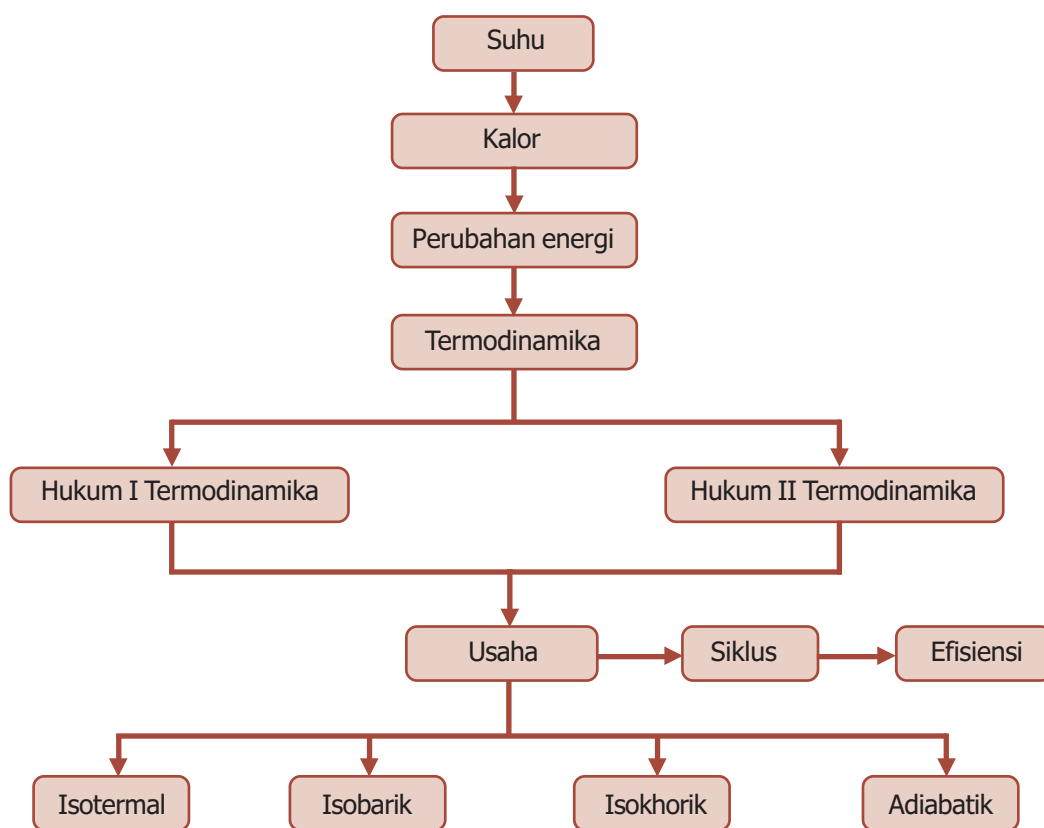


B. Jawablah dengan singkat dan benar!

- Gas oksigen pada suhu 27°C memiliki volume 20 liter dan tekanan $2 \times 10^5 \text{ N/m}^2$. Berapakah volume gas ketika tekanannya $16 \times 10^4 \text{ N/m}^2$ dan suhunya 47°C ?
- Gas oksigen ($Mr = 32$) massa 80 gram berada dalam tangki yang volumenya 8 liter. Hitunglah tekanan yang dilakukan oleh gas jika suhunya 27°C ?
- Suatu gas ideal ($Mr = 40$) berada dalam tabung tertutup dengan volume 8 liter. Jika suhu gas 57°C dan tekanan $2 \times 10^5 \text{ N/m}^2$, berapakah massa gas tersebut?
- Jika massa jenis gas nitrogen $1,25 \text{ kg/m}^3$, hitunglah kecepatan efektif partikel gas tersebut pada suhu 227°C dan tekanan $1,5 \times 10^5 \text{ N/m}^2$!
- Sebuah ban sepeda mempunyai volume 100 cm^3 . Tekanan awal dalam ban adalah 0,5 atm. Ban tersebut dipompa dengan suatu pompa yang volumenya 50 cm^3 . Tekanan udara luar 1 atm dan suhu dianggap tidak berubah. Berapakah tekanan ban sepeda setelah dipompa 4 kali?

PETA KONSEP

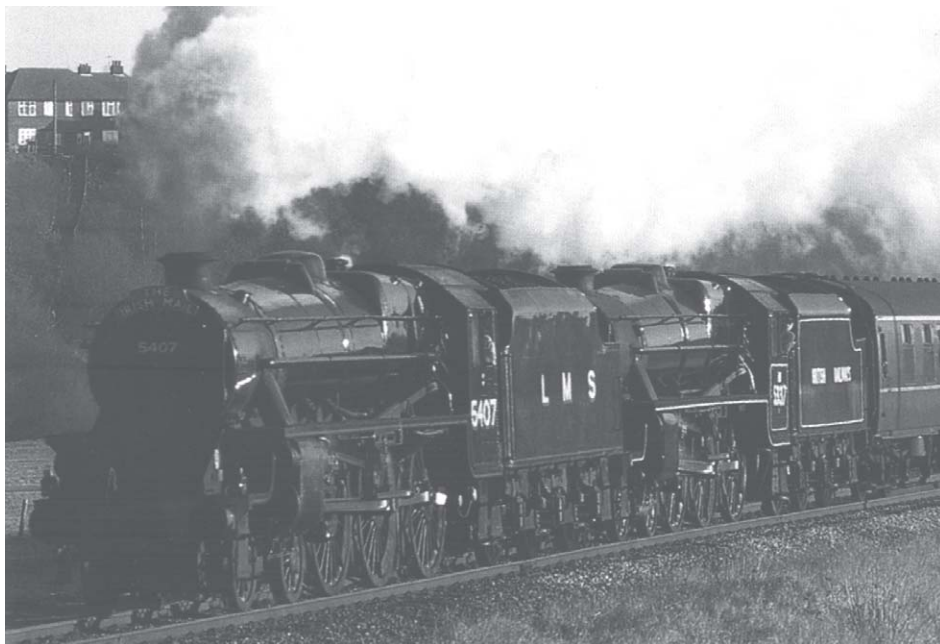
Bab 9 Termodinamika



BAB

9

TERMODINAMIKA



- Kereta api uap memanfaatkan prinsip termodinamika.

Sumber: *Ensiklopedia Iptek*,
PT Lentera Abadi, 2005

Dalam kehidupan sehari-hari sering kita temui hal-hal yang berhubungan dengan prinsip termodinamika. Pernahkah kalian melihat kereta lokomotif yang menggunakan mesin uap? Kereta tersebut menerapkan prinsip termodinamika. Energi panas yang dihasilkan melalui pembakaran batubara diubah menjadi energi mekanik yang dapat menggerakkan roda kereta. Proses korosi (perkaratan) juga merupakan contoh penerapan prinsip termodinamika. Begitu pula proses pelapukan kayu. Untuk memahami lebih lanjut ikutilah pembahasan berikut ini.

Kata Kunci

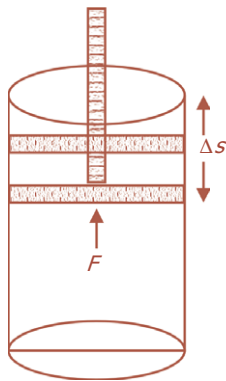
adiabatik, energi dalam, isobarik, isokhorik, isothermal, kalor, termodinamika, usaha

Termodinamika adalah cabang dari ilmu fisika yang mempelajari tentang proses perpindahan energi sebagai kalor dan usaha antara sistem dan lingkungan. Kalor didefinisikan sebagai perpindahan energi yang disebabkan oleh perbedaan suhu, sedangkan usaha merupakan perubahan energi melalui cara-cara mekanis yang tidak disebabkan oleh perubahan suhu. Proses perpindahan energi pada termodinamika berdasarkan atas dua hukum, yaitu Hukum I Termodinamika yang merupakan pernyataan Hukum Kekekalan Energi, dan Hukum II Termodinamika yang memberikan batasan tentang arah perpindahan kalor yang dapat terjadi.

Dalam membahas termodinamika kita akan mengacu pada sistem tertentu. Sistem adalah benda atau sekumpulan benda yang akan diteliti, sedangkan lingkungan adalah semua yang ada di sekitar benda. Sistem dibedakan menjadi beberapa macam. **Sistem terbuka** adalah sistem dimana antara sistem dan lingkungan memungkinkan terjadinya pertukaran materi dan energi. Apabila hanya terjadi pertukaran energi tanpa pertukaran materi, sistem disebut **sistem tertutup**. Adapun sistem terisolasi adalah jika antara sistem dan lingkungan tidak terjadi pertukaran materi dan energi.



Usaha dan Proses dalam Termodinamika



Gambar 9.1 Usaha yang dilakukan gas pada piston.

1. Usaha Sistem pada Lingkungan

Usaha yang dilakukan sistem pada lingkungannya merupakan ukuran energi yang dipindahkan dari sistem ke lingkungan. Gambar 9.1 menunjukkan suatu gas di dalam silinder tertutup dengan piston (penghisap) yang dapat bergerak bebas tanpa gesekan. Pada saat gas memuai, piston akan bergerak naik sejauh Δs . Apabila luas piston A , maka usaha yang dilakukan gas untuk menaikkan piston adalah gaya F dikalikan jarak Δs . Gaya yang dilakukan oleh gas merupakan hasil kali tekanan P dengan luas piston A , sehingga:

$$W = F \Delta s$$

$$W = P A \Delta s$$

karena $A \Delta s = \Delta V$, maka:

$$W = P \Delta V \text{ atau } W = P (V_2 - V_1) \dots\dots\dots (9.1)$$

dengan:

$$W = \text{usaha (J)} \qquad V_1 = \text{volume mula-mula (m}^3\text{)}$$

$$P = \text{tekanan (N/m}^2\text{)} \qquad V_2 = \text{volume akhir (m}^3\text{)}$$

$$\Delta V = \text{perubahan volume (m}^3\text{)}$$

Persamaan (9.1) berlaku jika tekanan gas konstan. Apabila $V_2 > V_1$, maka usaha akan positif ($W > 0$). Hal ini berarti gas (sistem) melakukan usaha terhadap lingkungan. Apabila $V_2 < V_1$, maka usaha akan negatif ($W < 0$). Hal ini berarti gas (sistem) menerima usaha dari lingkungan.

Untuk gas yang mengalami perubahan volume dengan tekanan tidak konstan, maka usaha yang dilakukan sistem terhadap lingkungan dirumuskan:

$$\begin{aligned} dW &= Fd \\ &= FPA \, ds \\ dW &= P \, dV \end{aligned}$$

Jika volume gas berubah dari V_1 menjadi V_2 , maka:

$$W = \int_{V_1}^{V_2} P \, dV \quad \dots\dots\dots (9.2)$$

Besarnya usaha yang dilakukan oleh gas sama dengan luas daerah di bawah kurva pada diagram P - V .

2. Usaha pada Beberapa Proses Termodinamika

Dalam termodinamika terdapat berbagai proses perubahan keadaan sistem, yaitu proses isothermal, isobarik, isokhorik, dan adiabatik.

a. Proses Isothermal

Proses isothermal adalah proses perubahan keadaan sistem pada suhu konstan. Usaha yang dilakukan sistem adalah:

$$W = \int_{V_1}^{V_2} P \, dV$$

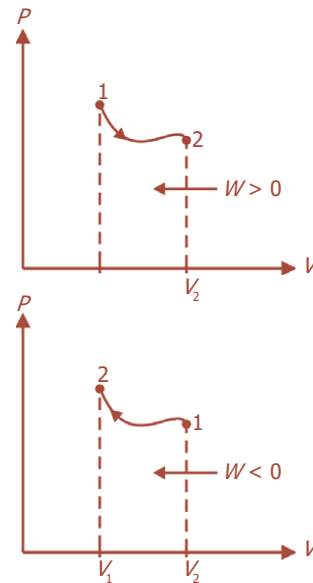
Karena $PV = n.R.T$ atau $P = \frac{n.R.T}{V}$, maka:

$$\begin{aligned} W &= \int_{V_1}^{V_2} \frac{n.R.T}{V} \, dV \\ &= n.R.T \int_{V_1}^{V_2} \frac{dV}{V} \end{aligned}$$

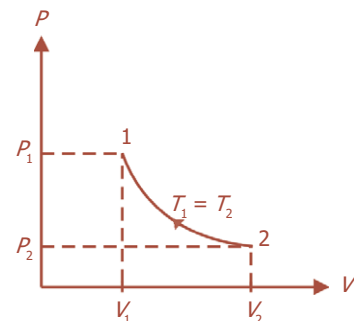
$$W = n.R.T (\ln V_2 - \ln V_1)$$

$$W = n.R.T \ln \left(\frac{V_2}{V_1} \right) \quad \dots\dots\dots (9.3)$$

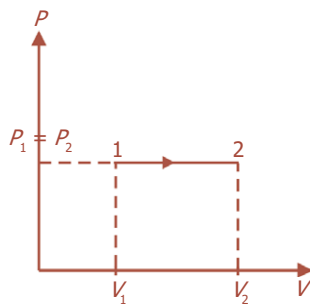
Grafik P - V pada proses isothermal ditunjukkan oleh Gambar 9.3.



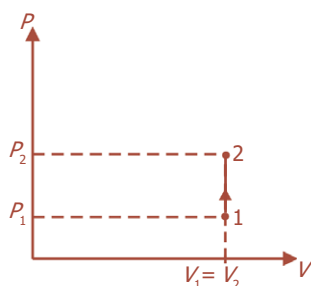
Gambar 9.2 Usaha yang dilakukan antara sistem dan lingkungan.



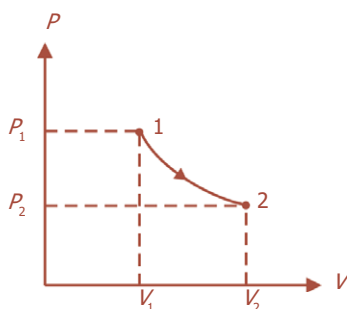
Gambar 9.3 Grafik proses isothermal.



Gambar 9.4 Grafik proses isobarik.



Gambar 9.5 Grafik proses isokhorik.



Gambar 9.6 Grafik proses adiabatik.

b. Proses Isobarik

Proses isobarik adalah proses perubahan keadaan sistem pada tekanan konstan. Usaha yang dilakukan oleh sistem adalah:

$$P \cdot W = \int_{V_1}^{V_2} P dV = P \int_{V_1}^{V_2} dV$$

$$W = P(V_2 - V_1) = P \cdot \Delta V \dots\dots\dots (9.4)$$

Grafik P - V pada proses isobarik ditunjukkan Gambar 9.4.

c. Proses Isokhorik

Proses isokhorik adalah proses perubahan keadaan sistem pada volume konstan. Pada proses isokhorik gas tidak mengalami perubahan volume, sehingga usaha yang dilakukan sistem sama dengan nol.

$$V_1 = V_2 = V$$

$$W = P(V_2 - V_1)$$

$$W = P(0) = 0 \dots\dots\dots (9.5)$$

Grafik P - V proses isobarik ditunjukkan Gambar 9.5.

d. Proses Adiabatik

Proses adiabatik adalah proses perubahan keadaan sistem tanpa adanya pertukaran kalor antara sistem dengan lingkungan. Proses adiabatik terjadi jika sistem terisolasi dengan baik atau proses terjadi dengan sangat cepat sehingga kalor yang mengalir dengan lambat tidak memiliki waktu untuk mengalir masuk atau keluar sistem. Hubungan antara tekanan dan volume pada proses adiabatik dinyatakan dalam rumus Poisson berikut:

$$P_1 V_1^\gamma = P_2 V_2^\gamma \dots\dots\dots (9.6)$$

dengan: $\gamma > 1$, yang besarnya:

$$\gamma = \frac{C_p}{C_v} \dots\dots\dots (9.7)$$

dengan: C_p = kapasitas kalor gas pada tekanan konstan

C_v = kapasitas kalor gas pada volume konstan

Pada gas ideal berlaku $P = \frac{n.R.T}{V}$, sehingga persamaan (9.6) dapat dinyatakan dalam bentuk:

$$T_1 V_1^{\gamma-1} = T_2 V_2^{\gamma-1} \dots\dots\dots (9.8)$$

Usaha yang dilakukan gas dalam proses adiabatik adalah:

$$W = \frac{1}{\gamma-1} (P_1 V_1 - P_2 V_2)$$

Grafik pada proses adiabatik mengalami penurunan agak curam dibandingkan grafik isothermal, seperti ditunjukkan oleh Gambar 9.6.

Contoh Soal

1. Gas helium dengan volume $1,5 \text{ m}^3$ dan suhu 27°C dipanaskan secara isobarik sampai 87°C . Jika tekanan gas helium $2 \times 10^5 \text{ N/m}^2$, berapakah usaha yang dilakukan oleh gas?

Penyelesaian:

Diketahui: $T_1 = 27^\circ\text{C} = 27 + 273 = 300 \text{ K}$ $V_1 = 1,5 \text{ m}^3$
 $T_2 = 87^\circ\text{C} = 87 + 273 = 360 \text{ K}$ $P = 2 \times 10^5 \text{ N/m}^2$

Ditanya: $W = \dots ?$

Jawab:

$$\frac{V_1}{T_1} = \frac{V_2}{T_2} \rightarrow \frac{1,5}{300} = \frac{V_2}{360} \rightarrow V_2 = \frac{360 \times 1,5}{300} = 1,8 \text{ m}^3$$

$$W = P(V_2 - V_1) = 2 \times 10^5 (1,8 - 1,5) = 6 \times 10^4 \text{ J}$$

2. Suatu gas ideal mengalami proses isothermal seperti pada grafik P - V di samping. Tentukan usaha yang dilakukan oleh gas tersebut!

Penyelesaian:

Diketahui: $V_A = 50 \text{ L} = 0,05 \text{ m}^3$
 $V_B = 10 \text{ L} = 0,01 \text{ m}^3$
 $P_A = 2 \times 10^3 \text{ N/m}^2$
 $P_B = 4 \times 10^3 \text{ N/m}^2$

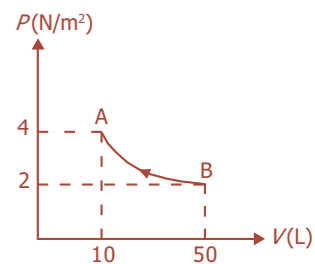
Ditanya: $W = \dots ?$

Jawab:

$$W_{AB} = nRT \ln \frac{V_B}{V_A}$$

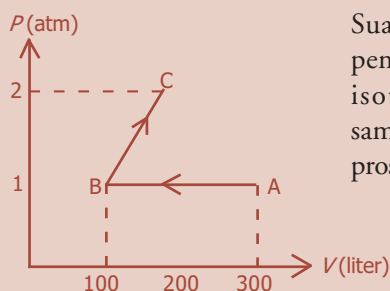
$$\frac{V_B}{V_A} = P_A \cdot V_A \ln \frac{V_B}{V_A}$$

$$\frac{V_B}{V_A} = 2 \times 10^3 (0,05) \ln \frac{0,01}{0,05} = (100)(-1,609) = -160,9 \text{ J}$$



Uji Kemampuan 9.1

- 1.

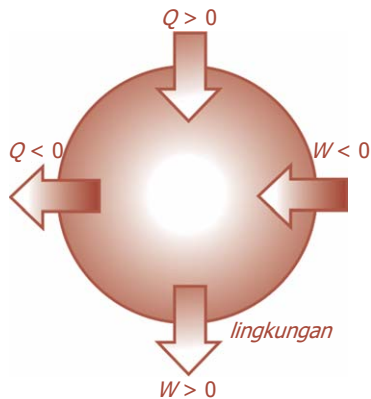


Suatu gas ideal mengalami dua proses, yaitu pemampatan isobarik, dilanjutkan pemanasan isothermal seperti ditunjukkan grafik di samping. Tentukan usaha yang dilakukan untuk proses ABC!

2. Suatu gas monoatomik dengan $\gamma = \frac{3}{2}$ dimampatkan secara adiabatik memerlukan usaha sebesar $2 \times 10^5 \text{ J}$. Volume mula-mula 15 m^3 dengan tekanan 2 atm . Berapakah volume akhir pada tekanan 1 atm ?



B. Hukum I Termodinamika



Gambar 9.7 Sistem melakukan pertukaran energi dengan lingkungan.

Hukum I Termodinamika berkaitan dengan Hukum Kekekalan Energi untuk sebuah sistem yang sedang melakukan pertukaran energi dengan lingkungan dan memberikan hubungan antara kalor, energi, dan kerja (usaha). Hukum I Termodinamika menyatakan bahwa untuk setiap proses, apabila kalor ditambahkan ke dalam sistem dan sistem melakukan usaha, maka akan terjadi perubahan energi. Jadi, dapat dikatakan bahwa Hukum I Termodinamika menyatakan adanya konsep kekekalan energi.

Energi dalam sistem merupakan jumlah total semua energi molekul pada sistem. Apabila usaha dilakukan pada sistem atau sistem memperoleh kalor dari lingkungan, maka energi dalam pada sistem akan naik. Sebaliknya, energi dalam akan berkurang apabila sistem melakukan usaha pada lingkungan atau sistem memberi kalor pada lingkungan. Dengan demikian, perubahan energi dalam pada sistem yang tertutup merupakan selisih kalor yang diterima dengan usaha yang dilakukan oleh sistem.

$$\Delta U = Q - W \text{ atau } Q = \Delta U + W \dots\dots\dots (9.9)$$

dengan:

ΔU = perubahan energi dalam (J)

Q = kalor yang diterima (J)

W = usaha (J)

Usaha W positif jika sistem melakukan usaha dan negatif jika usaha dilakukan pada sistem. Kalor Q positif jika sistem menerima kalor dan negatif jika sistem melepas kalor. Persamaan (9.9) dikenal dengan Hukum I Termodinamika.

1. Penerapan Hukum I Termodinamika

Pada bagian ini kita akan menggunakan Hukum I Termodinamika pada beberapa proses termodinamika, yaitu proses isobarik, isokhorik, isothermal, dan adiabatik. Konsep tentang energi dalam untuk gas monoatomik sesuai dengan teorema ekipartisi energi yang telah dibahas pada bab sebelumnya.

$$U = \frac{3}{2} N \cdot k \cdot T = \frac{3}{2} n \cdot R \cdot T$$

BETA[®] Berita Fisika

Rudolf Julius Clausius, fisikawan Jerman, merupakan orang pertama yang mengemukakan Hukum Termodinamika pada tahun 1850.

Pada sistem yang berubah dari suhu awal T_1 menjadi T_2 maka perubahan energi dalamnya dapat dituliskan:

$$\Delta U = U_2 - U_1 = \frac{3}{2} N \cdot k (T_2 - T_1) = \frac{3}{2} N \cdot k \Delta T$$

$$\text{atau } \Delta U = U_2 - U_1 = \frac{3}{2} n \cdot R (T_2 - T_1) = \frac{3}{2} n \cdot R \Delta T \dots\dots\dots (9.10)$$

karena:

$$P \cdot V = n \cdot R \cdot T$$

maka:

$$\Delta U = U_2 - U_1 = \frac{3}{2} (P_2 V_2 - P_1 V_1) = \frac{3}{2} \Delta(PV) \dots\dots\dots (9.11)$$

a. Proses Isotermal

Proses isotermal terjadi pada suhu konstan ($\Delta T = 0$)

$$\text{sehingga } \Delta U = \frac{3}{2} n \cdot R \cdot T = 0.$$

Berdasarkan Hukum I Termodinamika, maka:

$$Q = \Delta U + W$$

Menurut persamaan (9.3), maka pada proses isotermal

adalah $W = n \cdot R \cdot T = \ln\left(\frac{V_2}{V_1}\right)$, maka persamaan di atas dapat dituliskan:

$$Q = \Delta U + W$$

$$Q = 0 + nRT \ln\left(\frac{V_2}{V_1}\right)$$

$$Q = W = nRT \cdot \ln \frac{V_2}{V_1} \dots\dots\dots (9.12)$$

b. Proses Isobarik

Proses isobarik terjadi pada tekanan konstan ($\Delta P = 0$).

Sesuai Hukum I Termodinamika, maka:

$$Q = \Delta U + W$$

$$\text{Karena } \Delta U = \frac{3}{2} P \cdot \Delta V + P \cdot \Delta V$$

$$Q = \frac{5}{2} P \cdot \Delta V = \frac{5}{2} P (V_2 - V_1) \dots\dots\dots (9.13)$$

c. Proses Isokhorik

Proses isokhorik terjadi pada volume tetap ($\Delta V = 0$)

sehingga $W = P \cdot \Delta V = 0$. Berdasarkan Hukum I Termodinamika maka:

$$Q = \Delta U + W$$

$$Q = \Delta U + 0$$

$$Q = \frac{3}{2} n \cdot R (T_2 - T_1) = \frac{3}{2} n \cdot R \cdot \Delta T \dots\dots\dots (9.14)$$



Sumber: *Jendela Iptek Energi*,
PT Balai Pustaka, 2000

Gambar 9.8 Roket yang meluncur menggunakan prinsip termodinamika.

Komet

Kolom mengingat

Dalam menggunakan persamaan:

$Q = \Delta U + W$ harus diperhatikan hal-hal berikut ini.

1. Satuan harus sama.
2. Jika sistem menerima kalor maka Q positif, dan jika melepas kalor maka Q negatif.
3. Jika usaha dilakukan **oleh** sistem maka W positif, dan jika usaha dilakukan **pada** sistem maka W negatif.

Kapasitas kalor diukur dalam keadaan volume tetap atau tekanan tetap. Kapasitas kalor pada tekanan tetap bernilai lebih besar dibandingkan dengan pada volume tetap karena pada tekanan tetap jumlah energi yang diperlukan juga digunakan untuk memperbesar volumenya.

d. Proses Adiabatik

Dalam proses adiabatik tidak ada pertukaran energi antara sistem dengan lingkungan ($Q = 0$). Berdasarkan Hukum I Termodinamika, maka:

$$Q = \Delta U + W$$

$$0 = \Delta U + W$$

$$W = -\Delta U$$

$$W = -\frac{3}{2}nR(T_2 - T_1) = \frac{3}{2}nR\Delta T \dots\dots\dots (9.15)$$

2. Kapasitas Kalor

Kapasitas kalor adalah banyaknya kalor yang diperlukan untuk menaikkan suhu zat sebesar satu kelvin atau satu derajat celsius, dirumuskan:

$$C = \frac{Q}{\Delta T} \text{ atau } Q = C \cdot \Delta T \dots\dots\dots (9.16)$$

Ada dua macam kapasitas kalor pada gas, yaitu kapasitas kalor pada tekanan tetap (C_p) dan kapasitas kalor pada volume tetap (C_v). Kapasitas kalor gas pada tekanan tetap besarnya dapat diturunkan dari persamaan (9.13) pada proses isobarik.

$$C_p = \frac{\frac{5}{2}P \cdot \Delta V}{\Delta T} = \frac{\frac{5}{2}nR\Delta T}{\Delta T}$$

$$C_p = \frac{5}{2}nR \dots\dots\dots (9.17)$$

Kapasitas kalor gas pada volume tetap, besarnya dapat diturunkan dari persamaan (9.14) pada proses isokhorik.

$$C_v = \frac{Q}{\Delta T} = \frac{\frac{3}{2}nR\Delta T}{\Delta T}$$

$$C_v = \frac{3}{2}nR \dots\dots\dots (9.18)$$

Dari persamaan (9.17) dan (9.18) dapat diperoleh hubungan sebagai berikut:

$$C_p - C_v = \frac{5}{2}nR - \frac{3}{2}nR$$

$$C_p - C_v = nR \text{ atau } C_p = C_v + nR \dots\dots\dots (9.19)$$

Untuk gas diatomik, besarnya kapasitas kalor gas pada tekanan tetap dan kapasitas kalor pada volume tetap tergantung pada derajat kebebasan gas.

a. Pada suhu rendah (± 250 K)

$$\Delta U = \frac{3}{2}nR\Delta T, \text{ sehingga: } C_v = \frac{3}{2}nR \text{ dan } C_p = \frac{5}{2}nR$$

Besarnya konstanta Laplace (γ) adalah:

$$\gamma = \frac{C_p}{C_v} = 1,67$$

Komet

Kolom mengingat

Kapasitas kalor juga disebut harga air, karena untuk menaikkan 100 gram raksa sebesar 1 °C memerlukan kalor yang sama banyaknya untuk menaikkan suhu 3 gram air sebesar 1 °C, yaitu 3 kalori.

- b. Pada suhu sedang (± 500 K)

$$\Delta U = \frac{5}{2}n.R.\Delta T, \text{ sehingga } C_v = \frac{5}{2}n.R \text{ dan } C_p = \frac{7}{2}n.R$$

Besarnya konstanta Laplace (γ) adalah:

$$\gamma = \frac{C_p}{C_v} = 1,4$$

- c. Pada suhu tinggi (± 1.000 K)

$$\Delta U = \frac{7}{2}n.R.\Delta T, \text{ sehingga } C_v = \frac{7}{2}n.R \text{ dan } C_p = \frac{9}{2}n.R$$

Besarnya konstanta Laplace (γ) adalah:

$$\gamma = \frac{C_p}{C_v} = 1,28$$

Contoh Soal

1. Suatu gas menerima kalor 4.000 kalori, menghasilkan usaha sebesar 8.000 J. Berapakah perubahan energi dalam pada gas? (1 kalori = 4,18 joule)

Penyelesaian:

$$\begin{aligned} \text{Diketahui: } Q &= 4.000 \text{ kalori} = 16.720 \text{ J} \\ W &= 8.000 \text{ J} \end{aligned}$$

$$\text{Ditanya: } \Delta U = \dots ?$$

Jawab:

$$\Delta U = \Delta Q - W = (16.720 - 8.000) \text{ J} = 8.720 \text{ J}$$

2. Sejumlah 4 mol gas helium suhunya dinaikkan dari 0 °C menjadi 100 °C pada tekanan tetap. Jika konstanta gas umum $R = 8,314 \text{ J/mol.K}$, tentukan:
- perubahan energi dalam,
 - usaha yang dilakukan gas, dan
 - kalor yang diperlukan!

Penyelesaian:

$$\begin{aligned} \text{Diketahui: } n &= 4 \text{ mol} = 0,004 \text{ mol} \\ T_1 &= 0 \text{ }^\circ\text{C} = 0 + 273 = 273 \text{ K} \\ T_2 &= 100 \text{ }^\circ\text{C} = 100 + 273 = 373 \text{ K} \\ R &= 8,314 \text{ J/mol.K} \end{aligned}$$

$$\text{Ditanya : a. } \Delta U = \dots ?$$

$$\text{b. } W = \dots ?$$

$$\text{c. } Q = \dots ?$$

Jawab:

$$\text{a. } \Delta U = \frac{3}{2}n.R.(T_2 - T_1) = \frac{3}{2}(0,004 \times 8,314(373 - 273)) = 4,988 \text{ J}$$

$$\text{b. } W = P(V_2 - V_1) = nR(T_2 - T_1) = 0,004 \times 8,314 \times (373 - 273) = 3,326 \text{ J}$$

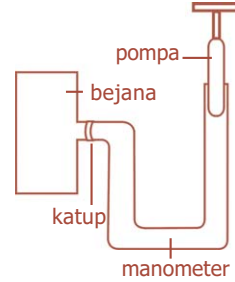
$$\text{c. } Q = \Delta U + W = (4,988 + 3,326) \text{ J} = 8,314 \text{ J}$$

Kegiatan

Tujuan : Mempelajari perbedaan antara perbedaan adiabatik dari isotermit.
Menentukan konstanta Laplace.
Alat dan bahan : Manometer, pompa, bejana, katup, air.

Cara Kerja:

1. Keluarkan manometer dan pasanglah di luar bejana.
2. Isilah manometer dengan air sampai batas skala nol.
3. Hubungkan manometer dengan bejana melalui katup keluar dan atur kedudukan air sama tinggi.
4. Pasanglah pompa pada katup lain.
5. Pompakan udara ke dalam bejana hingga perbedaan tinggi air dalam manometer kira-kira 20 cm.
6. Sesudah pemompaan berhenti tunggu beberapa menit sampai perbedaan tinggi air dalam manometer tetap. Catatlah perbedaan tingginya (h_1).
7. Bukalah katup keluar selama beberapa detik, kemudian tutuplah kembali.
8. Tunggulah selama tiga menit agar tinggi air dalam manometer tetap.



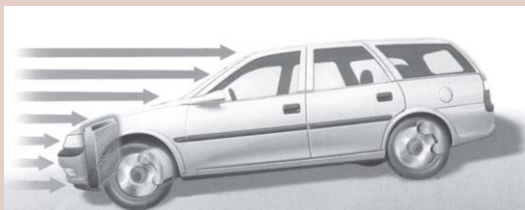
Diskusi:

1. Buatlah tabel untuk menuliskan data percobaan yang kalian lakukan!
2. Apakah nilai konstanta gas sama untuk setiap jenis gas? Jelaskan!
3. Jelaskan perbedaan proses adiabatik dan isotermit!
4. Bandingkanlah nilai γ untuk gas ideal dan gas riil!

Uji Kemampuan 9.2

1. Gas monoatomik 0,5 mol pada tekanan tetap suhunya dinaikkan dari 17 °C menjadi 93 °C. Diketahui $R = 8,31 \text{ J/mol.K}$, hitunglah kalor yang diperlukan!
2. Gas monoatomik dipanaskan pada volume tetap dengan kapasitas kalor 16 J/K. Jika $R = 8,31 \text{ J/mol.K}$, tentukan jumlah mol gas tersebut!

Percikan Fisika



Perubahan Energi

Hanya sebagian kecil panas dari pembakaran bahan bakar di dalam mesin yang diubah menjadi energi gerak. Sisanya dibuang sebagai gas panas melalui radiator dan diangkut oleh udara yang mengalir di sekitar mesin.

Ketika mobil bergerak, roda-roda menggesek aspal dan menjadi panas. Gesekan ini juga menghangatkan udara di sekitar mobil. Ketika rem menghentikan laju mobil, kanvas rem memanaskan dan mengubah seluruh energi kinetik menjadi panas.



C. Siklus pada Termodinamika

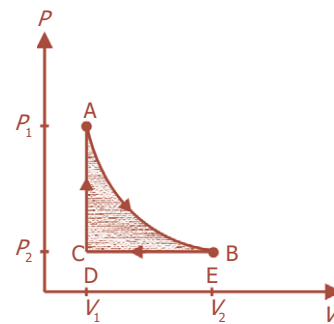
1. Pengertian Siklus dan Besar Usaha yang Dihasilkan

Bentuk energi apa pun dapat diubah seluruhnya menjadi panas. Namun, apabila energi panas diubah menjadi bentuk-bentuk lain, tidak pernah semuanya dapat berubah. Sebagian energi selalu tetap tinggal sebagai panas, dan suhu ini selalu tetap.

Suatu sistem dapat menyerap kalor dari lingkungan untuk melakukan usaha. Untuk dapat melakukan usaha terus-menerus tidak mungkin dilakukan hanya dengan satu proses termodinamika tertentu, karena suatu proses akan berhenti ketika tekanan, volume, atau suhu mencapai nilai maksimum. Oleh karena itu, sistem harus dikembalikan ke keadaan awal agar kalor dapat berubah menjadi usaha. Rangkaian proses sedemikian rupa sehingga akhirnya kembali pada keadaan semula disebut **siklus**.

Perhatikan Gambar 9.9. Suatu siklus termodinamika yang terdiri atas proses isokhorik, isothermal, dan isobarik. Sistem mengalami proses isothermal dari A ke B. Pada proses ini sistem menyerap kalor dari lingkungan sebesar Q_{AB} dan menghasilkan usaha W_{AB} yang besarnya sama dengan luas daerah ABEDA. Kemudian sistem mengalami proses isobarik dari B ke C. Sistem melepas kalor sebesar Q_{BC} dan melakukan usaha yang harganya negatif W_{BC} yang besarnya sama dengan daerah CBED. Energi dalam sistem berkurang sehingga suhunya turun. Akhirnya, sistem mengalami proses isokhorik dari C ke A. Sistem kembali ke keadaan semula dengan menyerap kalor Q_{CA} untuk menaikkan tekanan dan suhu sistem tanpa melakukan usaha ($W_{CA} = 0$). Rangkaian proses dari keadaan A ke keadaan B, keadaan C, dan kembali ke keadaan A disebut sebagai siklus.

Usaha yang dilakukan oleh sistem dalam satu siklus adalah $W = W_{AB} + W_{BC}$ yang besarnya sama dengan luas daerah yang diarsir pada grafik $P - V$ (luas ABC). Apabila arah proses dalam siklus searah putaran jarum jam, maka usaha bernilai positif, dan bernilai negatif apabila arah proses berlawanan arah putaran jarum jam.



Gambar 9.9 Siklus termodinamika.

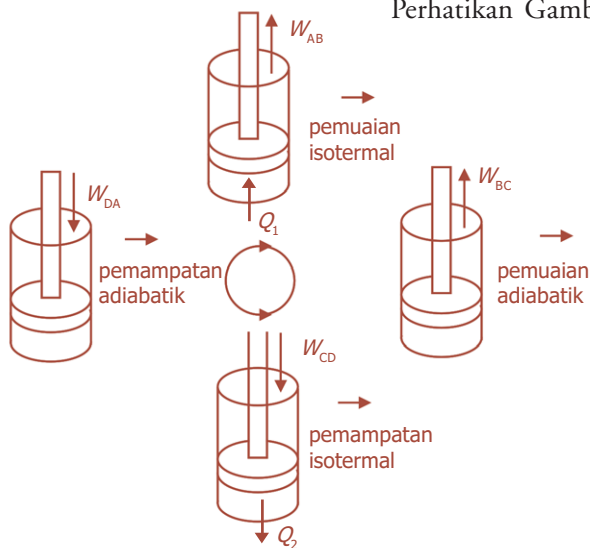
BETA^β Berita Fisika

Tanaman tumbuh karena menyerap sebagian energi matahari dan menyimpannya sebagai energi kimia di dalam jaringannya.

2. Siklus Carnot

Pada tahun 1824 seorang ilmuwan Prancis, Sadi Carnot (1796 - 1832), mengemukakan model mesin ideal yang dapat meningkatkan efisiensi melalui suatu siklus, yang dikenal dengan siklus Carnot. Mesin ideal Carnot bekerja berdasarkan mesin kalor yang dapat bekerja bolak-balik (*reversibel*), yang terdiri atas empat proses, yaitu dua proses isothermal dan dua proses adiabatik.

Perhatikan Gambar 9.10!



Gambar 9.10 Siklus Carnot.

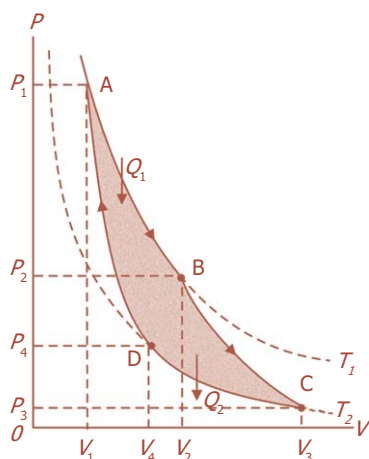
- 1) Proses AB adalah pemanasan isothermal pada suhu T_1 . Pada proses ini sistem menyerap kalor Q_1 dari sumber (*reservoir*) bersuhu tinggi T_1 dan melakukan usaha sebesar W_{AB} . Grafik P - V untuk pemanasan isothermal dari A ke B ditunjukkan pada Gambar 9.9.
- 2) Proses BC adalah pemanasan adiabatik. Pada proses ini sistem tidak menyerap atau melepas kalor, tetapi melakukan usaha sebesar W_{BC} dan suhunya turun dari T_1 sampai T_2 .
- 3) Proses CD adalah pemampatan isothermal pada suhu T_2 . Pada proses ini sistem melepas kalor ke reservoir bersuhu rendah T_2 sebesar Q_2 dan menerima usaha sebesar W_{CD} .

- 4) Proses DA adalah pemampatan adiabatik. Pada proses ini sistem tidak menyerap ataupun melepas kalor. Sistem menerima usaha sebesar W_{DA} sehingga suhu naik dari T_2 menjadi T_1 .

Usaha total yang dilakukan sistem dalam satu siklus sama dengan luas daerah di dalam siklus pada grafik P - V (ABCD).

Pada siklus Carnot, sistem menyerap kalor dari *reservoir* bersuhu tinggi T_1 sebesar Q_1 dan melepas kalor ke reservoir bersuhu rendah T_2 sebesar Q_2 , karena pada proses tersebut keadaan awal sama dengan keadaan akhir, maka perubahan energi dalam $\Delta U = 0$. Berdasarkan Hukum I Termodinamika, maka:

$$\begin{aligned} Q &= \Delta U + W \\ Q_1 - Q_2 &= 0 + W \\ W &= Q_1 - Q_2 \dots\dots\dots (9.20) \end{aligned}$$



Gambar 9.11 Grafik P - V untuk gas ideal dalam siklus Carnot.

Siklus Carnot memberikan informasi mengenai sifat dari setiap mesin kalor. Siklus tersebut menetapkan batas atas (*upper limit*) kepada daya guna mesin sehingga dapat memberikan kita ke arah tujuan untuk bekerja.

Dengan demikian, pada mesin Carnot telah terjadi perubahan energi kalor menjadi usaha. Mesin yang mengubah energi kalor menjadi usaha disebut **mesin kalor**. Efisiensi mesin kalor dinyatakan sebagai perbandingan antara usaha yang dilakukan mesin dengan kalor yang diserap. Secara matematis dituliskan:

$$\eta = \frac{W}{Q_1} \times 100\% \dots\dots\dots (9.21)$$

atau

$$\eta = \left(1 - \frac{Q_2}{Q_1}\right) \times 100\% \dots\dots\dots (9.22)$$

Pada siklus Carnot berlaku $\frac{Q_2}{Q_1} = \frac{T_2}{T_1}$, sehingga persamaan (9.22) dapat dinyatakan:

$$\eta = \left(1 - \frac{T_2}{T_1}\right) \times 100\% \dots\dots\dots (9.23)$$

dengan:

η = efisiensi

Q_1 = kalor yang diserap (J)

Q_2 = kalor yang dilepas (J)

T_1 = suhu pada *reservoir* bersuhu tinggi (K)

T_2 = suhu pada *reservoir* bersuhu rendah (K)

Persamaan (9.23) merupakan efisiensi maksimum pada mesin kalor.

Contoh Soal

Suatu mesin Carnot dengan *reservoir* panasnya bersuhu 400 K mempunyai efisiensi 40%. Jika mesin tersebut *reservoir* panasnya bersuhu 640 K, tentukan efisiensinya!

Penyelesaian:

Diketahui: $T_1 = 400$ K

$\eta_1 = 40\%$

Ditanya: $\eta = \dots ?$ ($T_1 = 640$ K)

Jawab:

$$\eta = \left(1 - \frac{T_2}{T_1}\right) \times 100\%$$

$$0,4 = 1 - \frac{T_2}{T_1}$$

$$0,4 = 1 - \frac{T_2}{400}$$

$$\frac{T_2}{400} = 0,6$$

$$\frac{400}{T_2} = 240$$

Untuk $T_1 = 640$ K maka:

$$\eta = \left(1 - \frac{T_2}{T_1}\right) \times 100\%$$

$$= \left(1 - \frac{240}{640}\right) \times 100\%$$

$$= 62,5\%$$

Uji Kemampuan 9.3

Sebuah mesin Carnot memiliki efisiensi 20%. Dengan menurunkan suhu *reservoir* rendah sebesar 40 °C, efisiensi mesin menjadi 50%. Tentukan suhu *reservoir* tinggi dan rendah!



D. Hukum II Termodinamika



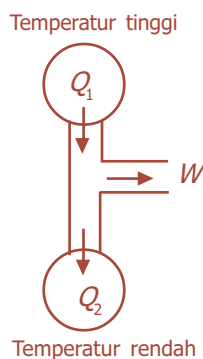
Penerapan Hukum II Termodinamika dapat diamati pada mesin kalor, yaitu alat yang dapat mengubah energi termal (panas) menjadi energi mekanik.

Hukum Kekekalan Energi yang dinyatakan dalam Hukum I Termodinamika menyatakan bahwa energi dapat diubah dari satu bentuk ke bentuk lain. Misalnya, perubahan usaha (energi potensial) menjadi energi kalor atau sebaliknya. Akan tetapi, tidak semua perubahan energi yang terjadi di alam ini prosesnya dapat dibalik seperti pada Hukum I Termodinamika. Contoh, sebuah benda yang jatuh dari ketinggian h sehingga menumbuk lantai. Pada peristiwa ini terjadi perubahan energi kinetik menjadi energi kalor (panas) dan sebagian kecil menjadi energi bunyi. Mungkinkah energi-energi kalor dapat berubah menjadi energi kinetik dan menggerakkan benda setinggi h ? Jelas bahwa hal ini akan terjadi, meskipun benda kita panaskan terus-menerus.

Hukum II Termodinamika memberikan batasan-batasan terhadap perubahan energi yang mungkin terjadi dengan beberapa perumusan.

1. Tidak mungkin membuat mesin yang bekerja dalam satu siklus, menerima kalor dari sebuah *reservoir* dan mengubah seluruhnya menjadi energi atau usaha luas (Kelvin Planck).
2. Tidak mungkin membuat mesin yang bekerja dalam suatu siklus mengambil kalor dari sebuah *reservoir* rendah dan memberikan pada *reservoir* bersuhu tinggi tanpa memerlukan usaha dari luar (Clausius).
3. Pada proses *reversibel*, total entropi semesta tidak berubah dan akan bertambah ketika terjadi proses *irreversibel* (Clausius).

Untuk menjelaskan tidak adanya reversibilitas para ilmuwan merumuskan prinsip baru, yaitu **Hukum II Termodinamika**, dengan pernyataan: “kalor mengalir secara alami dari benda yang panas ke benda yang dingin, kalor tidak akan mengalir secara spontan dari benda dingin ke benda panas”.



Gambar 9.12 Bagan transfer kalor pada mesin pemanas.

1. Pengertian Entropi

Termodinamika menyatakan bahwa proses alami cenderung bergerak menuju ke keadaan ketidakteraturan yang lebih besar. Ukuran ketidakteraturan ini dikenal dengan sistem entropi. Entropi merupakan besaran termodinamika yang menyerupai perubahan setiap keadaan, dari keadaan awal hingga keadaan akhir sistem. Semakin tinggi entropi suatu sistem menunjukkan sistem semakin tidak teratur. Entropi sama seperti halnya tekanan dan temperatur, yang merupakan salah satu sifat dari sifat fisis yang dapat diukur dari sebuah sistem. Apabila sejumlah kalor Q diberikan pada suatu sistem dengan proses *reversibel* pada suhu konstan, maka besarnya perubahan entropi sistem adalah:

$$\Delta S = \frac{Q}{T} \dots\dots\dots (9.24)$$

dengan:

ΔS = perubahan entropi (J/K)

Q = kalor (J)

T = suhu (K)

2. Mesin Pendingin

Mesin pendingin merupakan peralatan yang prinsip kerjanya berkebalikan dengan mesin kalor. Pada mesin pendingin terjadi aliran kalor dari *reservoir* bersuhu rendah ke *reservoir* bersuhu tinggi dengan melakukan usaha pada sistem. Contohnya, pada lemari es (kulkas) dan pendingin ruangan (AC). Bagan mesin pendingin dapat dilihat pada Gambar 9.13.

Ukuran kinerja mesin pendingin yang dinyatakan dengan koefisien daya guna merupakan hasil bagi kalor yang dipindahkan dari *reservoir* bersuhu rendah Q_2 terhadap usaha yang dibutuhkan W .

$$K_p = \frac{Q_2}{W} = \frac{Q_2}{Q_1 - Q_2} = \frac{T_2}{T_1 - T_2} \dots\dots\dots (9.25)$$

dengan:

K_p = koefisien daya guna

W = usaha yang diperlukan (J)

Q_1 = kalor yang diberikan pada *reservoir* suhu tinggi (J)

Q_2 = kalor yang diserap pada *reservoir* suhu rendah (J)

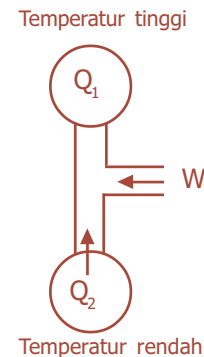
T_1 = suhu pada *reservoir* bersuhu tinggi (K)

T_2 = suhu pada *reservoir* bersuhu rendah (K)



Sumber: *Jendela Iptek Materi*,
PT Balai Pustaka, 2000

Gambar 9.13 Perkaratan pada benda merupakan contoh perkaratan yang tidak dapat dibalikkan.



Gambar 9.14 Bagan transfer kalor pada mesin pendingin.

Contoh Soal

Mesin pendingin ruangan memiliki daya 500 watt. Jika suhu ruang $-3\text{ }^{\circ}\text{C}$ dan suhu udara luar $27\text{ }^{\circ}\text{C}$, berapakah kalor maksimum yang diserap mesin pendingin selama 10 menit? (efisiensi mesin ideal).

Penyelesaian:

Diketahui: $P = 600\text{ watt}$ (usaha 500 J tiap 1 sekon)

$$T_1 = 27\text{ }^{\circ}\text{C} = 27 + 273 = 300\text{ K}$$

$$T_2 = -3\text{ }^{\circ}\text{C} = -3 + 273 = 270\text{ K}$$

Ditanya: $Q_2 = \dots ?$ ($t = 10\text{ sekon}$)

Jawab:

$$K_p = \frac{T_2}{T_1 - T_2} \rightarrow \frac{Q_2}{W} = \frac{T_2}{T_1 - T_2} \rightarrow Q_2 = \frac{270}{300 - 270} \times 500$$

$$Q_2 = 4.500\text{ J (tiap satu sekon)}$$

Dalam waktu 10 menit = 600 s, maka:

$$Q_2 = 4.500 \times 600 = 2,7 \times 10^6\text{ J}$$

Uji Kemampuan 9.4

1. Es sebanyak 3 kg diubah seluruhnya menjadi air pada suhu $0\text{ }^{\circ}\text{C}$. Jika perubahan entropi adalah $3 \times 10^4\text{ J/K}$, berapakah kalor lebur es tersebut?
2. Sebuah gas ideal perlahan-lahan mulai memuai dari 2 m^3 menjadi 3 m^3 pada temperatur konstan $30\text{ }^{\circ}\text{C}$. Perubahan entropi gas adalah 47 J/K selama proses tersebut. Berapa besar panas yang ditambahkan pada gas selama proses tersebut?

Fiesta

Fisikawan Kita



Sadi Carnot (1796 - 1832)

Ia seorang ahli fisika dari Prancis dari keluarga bangsawan, ayahnya bernama Lazare Carnot. Sadi Carnot belajar di sekolah Tinggi Politeknik. Ia sangat tertarik menyelidiki manfaat energi panas pada mesin uap. Dalam bukunya *Reflexion Sur la Puissance Motrice de Feu* Carnot mencoba mencari jawaban apakah daya penggerak panas itu tidak terbatas. Apakah penyempurnaan mesin uap itu dapat berlangsung terus menerus (tidak terbatas). Lalu ia menemukan bahwa efisiensi suatu mesin tergantung dari perbedaan temperatur antara sumber panas, yaitu ketel pemanas dan penerima panas pada mesin uap. Proses pemanasan uap digunakan untuk mendorong piston dan menarik kembali piston itu dengan cara mencairkan uap secara terus-menerus. Proses ini disebut lingkaran Carnot atau siklus Carnot.

- ✳ Usaha yang dilakukan gas pada tekanan konstan adalah $W = P \Delta V = P (V_2 - V_1)$ (proses isobarik). Jika W bernilai positif maka sistem melakukan usaha terhadap lingkungan ($V_2 > V_1$), dan apabila W bernilai negatif maka sistem menerima usaha dari lingkungan ($V_2 < V_1$).

- ✳ Usaha yang dilakukan oleh gas pada beberapa proses termodinamika adalah sebagai berikut:

- proses isothermal: $W = nRT \ln \left(\frac{V_2}{V_1} \right)$
- proses isobarik: $W = P \Delta V = P (V_2 - V_1)$
- proses isokhorik: $W = 0$
- proses adiabatik: $P_1 V_1^\gamma = P_2 V_2^\gamma$
 $W = -\frac{3}{2} n R (T_2 - T_1)$

- ✳ Hukum I Termodinamika menyatakan perubahan energi dalam pada sistem yang tertutup merupakan selisih kalor yang diterima dengan usaha yang dilakukan oleh sistem.

$$\Delta U = Q - W \text{ atau } Q = \Delta U + W$$

Q positif jika sistem menerima kalor dan negatif jika sistem melepas kalor.

- ✳ Kapasitas kalor (C) adalah banyaknya kalor yang diperlukan untuk menaikkan suhu zat sebesar satu kelvin.

$$C = \frac{Q}{\Delta T}$$

Kapasitas kalor pada tekanan tetap untuk gas monoatomik dirumuskan:

$$C_p = \frac{5}{2} nR$$

Kapasitas kalor pada volume tetap untuk gas diatomik dirumuskan:

$$C_v = \frac{3}{2} nR$$

- ✳ Untuk gas diatomik, kapasitas kalor pada tekanan tetap dan kapasitas kalor pada volume tetap tergantung pada derajat kebebasannya.

$$\text{Suhu rendah: } C_v = \frac{3}{2} nR \text{ dan } C_p = \frac{5}{2} nR$$

$$\text{Suhu sedang: } C_v = \frac{5}{2} nR \text{ dan } C_p = \frac{7}{2} nR$$

$$\text{Suhu tinggi: } C_v = \frac{7}{2} nR \text{ dan } C_p = \frac{9}{2} nR$$

- * Mesin kalor mengubah energi kalor menjadi usaha. Efisiensi mesin kalor adalah perbandingan antara usaha yang dilakukan dengan kalor yang diserap.

$$\eta = \frac{W}{Q_1} \times 100\% = \left(1 - \frac{Q_2}{Q_1} \right) \times 100\%$$

Untuk mesin Carnot berlaku:

$$\eta = \left(1 - \frac{T_2}{T_1} \right) \times 100\%$$

- * Pada mesin pendingin terjadi aliran kalor dari *reservoir* dingin T_2 ke *reservoir* panas T_1 dengan melakukan usaha pada sistem. Koefisien daya guna (kinerja) mesin pendingin dirumuskan:

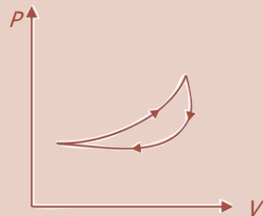
$$K_p = \frac{Q_2}{W} = \frac{Q_2}{Q_1 - Q_2} = \frac{T_2}{T_1 - T_2}$$

Uji Kompetensi

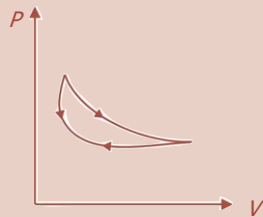
A. Pilihlah jawaban yang paling tepat!

1. Di dalam ruang tertutup berisi gas ideal, mula-mula terjadi pemuaian secara isothermal, kemudian dimampatkan secara isobarik akhirnya kembali ke keadaan semula secara adiabatik. Siklus proses tersebut pada grafik $P - V$ adalah

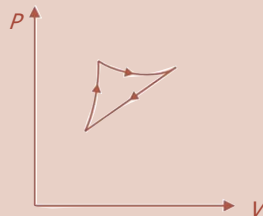
a.



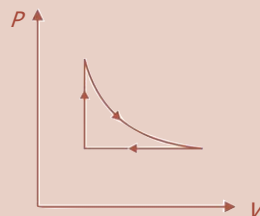
b.



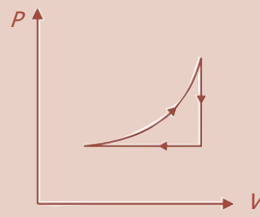
c.



d.



e.

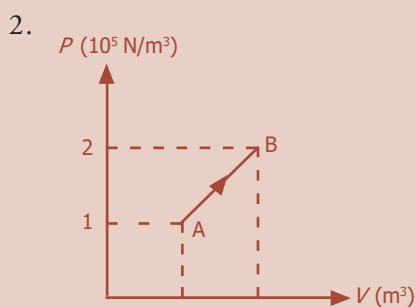


2. Di dalam ruang tertutup terdapat 2 mol gas yang volumenya 20 liter, tekanannya 3 atm ($1 \text{ atm} = 10^5 \text{ N/m}^2$) dan suhunya 27°C . Gas mengalami proses isothermal sehingga volumenya menjadi 80 liter. Jika $\ln 4 = 1,386$, maka usaha luar yang dilakukan gas adalah ... ($R = 8,31 \times 10 \text{ J/mol.K}$)
 - a. 3.455 J
 - b. 4.286 J
 - c. 5.417 J
 - d. 6.910 J
 - e. 7.093 J
3. Suatu gas volumenya $5 \times 10^{-2} \text{ m}^3$ dinaikkan pada tekanan tetap sehingga menjadi 4 kali semula. Jika usaha luar yang dilakukan gas sebesar $3 \times 10^4 \text{ J}$, maka tekanan gas adalah ...
 - a. $1,5 \times 10^5 \text{ N/m}^2$
 - b. $2,0 \times 10^5 \text{ N/m}^2$
 - c. $3,0 \times 10^5 \text{ N/m}^2$
 - d. $4,0 \times 10^5 \text{ N/m}^2$
 - e. $6,0 \times 10^5 \text{ N/m}^2$
4. Sejumlah gas ideal dengan massa tertentu mengalami pemampatan secara adiabatik. Jika W adalah kerja yang dilakukan oleh sistem dan ΔT adalah perubahan suhu dari sistem, maka berlaku keadaan ...
 - a. $W = 0, \Delta T > 0$
 - b. $W = 0, \Delta T < 0$
 - c. $W > 0, \Delta T = 0$
 - d. $W < 0, \Delta T > 0$
 - e. $W < 0, \Delta T < 0$
5. Sejumlah gas ideal dipanaskan dengan volume konstan. Pernyataan berikut ini yang benar adalah ...
 - a. energi kinetik konstan
 - b. momentum molekul gas konstan
 - c. energi dalam gas bertambah
 - d. energi dalam gas konstan
 - e. kalor yang diberikan pada gas digunakan untuk melakukan usaha
6. Suatu sistem mengalami proses adiabatik, pada sistem dilakukan usaha 100 J. Jika perubahan energi dalam sistem adalah ΔU dan kalor yang diserap sistem adalah Q , maka ...
 - a. $\Delta U = -100 \text{ J}$
 - b. $\Delta U = 10 \text{ J}$
 - c. $\Delta U = 100 \text{ J}$
 - d. $Q = 0$
 - e. $\Delta U + Q = -100 \text{ J}$
7. Suatu turbin memakai uap dengan suhu awal 55°C dan membuangnya pada suhu 35°C . Efisiensi maksimum mesin tersebut adalah ...
 - a. 33%
 - b. 43%
 - c. 53%
 - d. 63%
 - e. 73%
8. Sebuah mesin Carnot yang menggunakan *reservoir* suhu tinggi 27°C mempunyai efisiensi sebesar 30%, maka *reservoir* suhu rendahnya bersuhu ...
 - a. 166 K
 - b. 183 K
 - c. 210 K
 - d. 246 K
 - e. 273 K

9. Sebuah mesin Carnot yang menggunakan *reservoir* suhu tinggi bersuhu 800 K mempunyai efisiensi sebesar 40%. Agar efisiensinya naik menjadi 50%, maka suhu *reservoir* suhu tinggi dinaikkan menjadi
- 900 K
 - 960 K
 - 1.000 K
 - 1.180 K
 - 1.600 K
10. Enam puluh gram balok es pada suhu 0 °C dan tekanan 1 atm melebur seluruhnya menjadi air. Jika kalor laten es 79,7 kal/g, maka perubahan entropi es tersebut adalah
- 17,5 kal/K
 - 15,5 kal/K
 - 10,5 kal/K
 - 5,8 kal/K
 - 4,8 kal/K

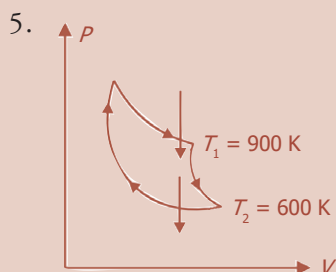
B. Jawablah dengan singkat dan benar!

- Suatu gas berada dalam tabung tertutup yang volumenya 500 liter dan tekanan 4 atm ($1 \text{ atm} = 1 \times 10^5 \text{ N/m}^2$). Hitunglah usaha yang dilakukan oleh gas, jika:
 - gas mengalami proses isobarik sehingga volumenya 4 kali volume semula,
 - gas mengalami pemampatan isobarik sehingga volumenya menjadi setengah kali semula!



Suatu gas ideal monoatomik berada dalam tabung tertutup. Keadaan mula-mula di A yang volumenya 2,5 m³, tekanan 10^5 N/m^2 , dan suhunya 250 K seperti tampak pada grafik $P - V$ di samping. Jika gas dipanaskan hingga volumenya menjadi 10 m³ dan tekanan $2 \times 10^5 \text{ N/m}^2$, hitunglah kalor yang diserap oleh gas!

- Gas argon dengan volume 3 liter bertekanan 2 atm. Gas mengalami proses adiabatik hingga volumenya menjadi 5 liter. Jika gas melakukan usaha sebesar 80 joule, hitunglah tekanan akhir gas tersebut!
- Mesin Carnot dioperasikan antara dua *reservoir* kalor masing-masing suhunya T_1 dan T_2 dengan $T_2 > T_1$. Efisiensi mesin 40% dengan $T_1 = 27^\circ \text{C}$. Tentukan besarnya perubahan T_2 agar efisiensinya menjadi 60%!

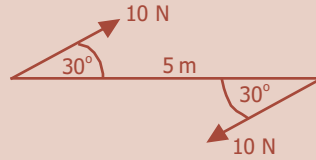


Gambar di samping adalah grafik $P - V$ pada mesin Carnot. Apabila usaha yang dilakukan sistem $W = 3 \times 10^5 \text{ J}$, berapakah kalor yang diserap mesin (Q_1) tiap siklus?

Uji Kompetensi Semester 2

A. Pilihlah jawaban yang paling tepat!

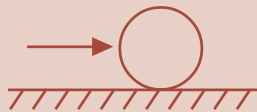
1.



Sebuah batang homogen panjang 5 m pada masing-masing ujungnya bekerja gaya sebesar 10 N membentuk sudut 30° terhadap batang. Besar momen kopel gaya tersebut adalah

- 15 Nm sesuai arah jarum jam
 - 20 Nm sesuai arah jarum jam
 - 25 Nm sesuai arah jarum jam
 - $25\sqrt{3}$ Nm sesuai arah jarum jam
 - 50 Nm sesuai arah jarum jam
2. Sebuah roda memiliki massa 40 kg dan diameter 120 cm, berputar dengan kecepatan sudut 5 rad/s. Besar momentum sudutnya adalah
- 24 kgm^2/s
 - 30 kgm^2/s
 - 36 kgm^2/s
 - 60 kgm^2/s
 - 72 kgm^2/s
3. Dua buah benda A dan B masing-masing massanya 5 kg, dihubungkan oleh batang yang panjangnya 1 m (massa batang diabaikan). Jika pusat batang digunakan sebagai sumbu putar, maka momen inersia di pusat batang tersebut adalah
- 2,5 kgm^2
 - 3,0 kgm^2
 - 3,5 kgm^2
 - 4,0 kgm^2
 - 5,0 kgm^2
4. Sebuah roda pejal jari-jarinya 20 cm dan massanya 5 kg. Pada roda itu bekerja momen gaya sebesar 10 Nm. Besar percepatan sudut roda itu adalah
- 0,1 rad/s^2
 - 5 rad/s^2
 - 10 rad/s^2
 - 20 rad/s^2
 - 100 rad/s^2

5.



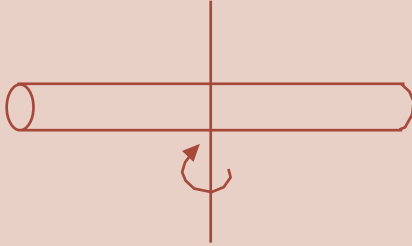
Sebuah kelereng bermassa m dan diameter d , diletakkan di atas bidang datar dan dikerjakan gaya di tengah-tengahnya seperti gambar. Kelereng menggelinding sempurna dengan kecepatan sudut pada saat t sebesar ω dan kecepatan linier v . Energi kinetik kelereng pada saat t adalah

- $\frac{1}{2}mv^2 + \frac{1}{20}m.d^2.\omega^2$
- $\frac{1}{2}mv^2 + \frac{1}{10}m.d^2.\omega^2$
- $\frac{1}{2}mv^2 + \frac{1}{2}m.\omega^2$
- $\frac{1}{2}mv^2 + \frac{1}{2}m.d^2.\omega^2$
- $\frac{1}{2}mv^2 + \frac{3}{2}m.d^2.\omega^2$

6. Sebuah roda berbentuk silinder pejal berjari-jari 10 cm dan bermassa 5 kg. Jika roda tersebut diputar pada sumbunya dengan kecepatan sudut 5 rad/s, maka energi kinetiknya adalah

a. 0,3125 J
b. 0,625 J
c. 3,125 J
d. 6,25 J
e. 31,25 J

7.

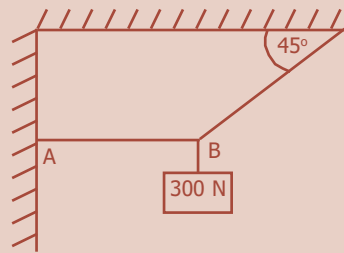


a. 15 J
b. 30 J
c. 45 J

Batang homogen panjangnya 60 cm dan massanya 5 kg diputar melalui poros yang berada di tengah-tengah batang, seperti pada gambar. Besar kecepatan linier ujung batang adalah 6 m/s. Besar energi kinetik rotasi batang itu adalah

d. 60 J
e. 90 J

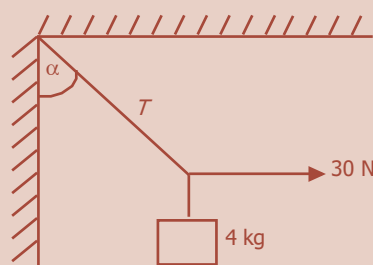
8.



Sistem seperti pada gambar berada dalam kesetimbangan. Besar tegangan tali AB adalah

a. nol
b. 150 N
c. 210 N
d. 300 N
e. 400 N

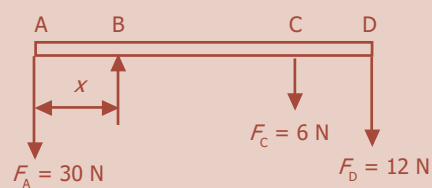
9.



Sistem seperti pada gambar berada dalam keadaan setimbang. Jika $g = 10 \text{ m/s}^2$, tegangan tali T dan α adalah

a. 40 N dan 37°
b. 50 N dan 37°
c. 50 N dan 45°
d. 50 N dan 53°
e. 60 N dan 37°

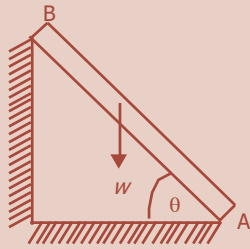
10.



Perhatikan gambar di samping! Jika $AD = 1 \text{ m}$, $CD = 0,2 \text{ m}$, massa batang diabaikan, dan sistem dalam keadaan setimbang, maka harga x adalah

a. 0,15 m
b. 0,20 m
c. 0,25 m
d. 0,30 m
e. 0,35 m

11.

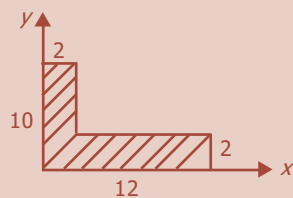


Batang AB homogen panjangnya ℓ , bersandar pada dinding vertikal yang licin. Jika berat batang w , sudut kemiringan $\theta = 60^\circ$ dan benda dalam keadaan seimbang, maka koefisien gesekan antara batang di A dengan alasnya pada saat itu adalah

- a. $\frac{1}{2}\sqrt{3}$
- b. $\frac{1}{3}\sqrt{3}$
- c. $\frac{1}{4}\sqrt{3}$

- d. $\frac{1}{6}\sqrt{3}$
- e. $\frac{1}{8}\sqrt{3}$

12.

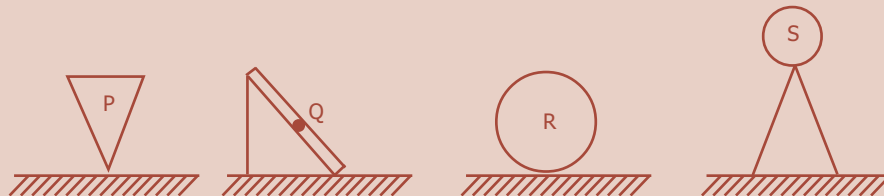


Suatu bidang datar homogen dengan bentuk dan ukurannya seperti gambar. Koordinat titik berat bidang tersebut adalah

- a. (4,3)
- b. (4,4)
- c. (3,4)

- d. (5,3)
- e. (3,5)

13. Perhatikan gambar-gambar berikut!

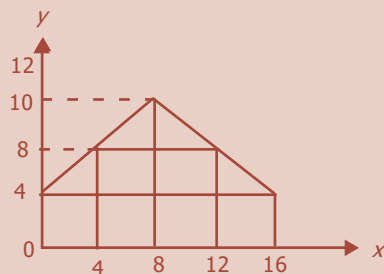


Benda-benda yang mengalami kesetimbangan labil adalah

- a. P dan S
- b. Q dan S
- c. Q dan R

- d. P, Q, dan S
- e. P, Q, R, dan S

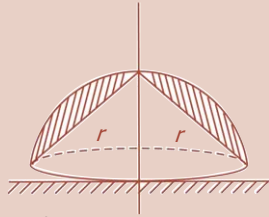
14.



Koordinat titik berat bangun luas seperti gambar di samping adalah

- a. $(8, 8/7)$
- b. $(8, 12/7)$
- c. $(8, 18/7)$
- d. $(8, 26/7)$
- e. $(8, 30/7)$

15.



- a. $r/8$
- b. $r/6$
- c. $r/3$

Setengah bola homogen jari-jari r terletak pada lantai mendatar seperti pada gambar. Jika bagian bawah dilubangi berupa kerucut yang jari-jari alas dan tingginya $= r$, maka koordinat titik berat bidang tersebut adalah

- d. $r/2$
- e. $2r/3$

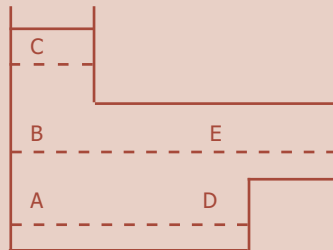
16. Apabila pipa barometer diganti dengan pipa luas penampangnya dua kalinya, maka pada tekanan udara luar 1 atm, tinggi air raksa dalam pipa adalah

- a. 19 cm
- b. 38 cm
- c. 76 cm
- d. 114 cm
- e. 152 cm

17. Suatu zat cair mempunyai kerapatan 1.020 kg/m^3 . Tekanan zat cair akan menjadi 101% dari tekanan pada permukaan (tekanan atmosfer $= 1,01 \times 10^5 \text{ N/m}^2$), pada kedalaman

- a. 9,8 cm
- b. 10,0 cm
- c. 10,1 cm
- d. 10,2 cm
- e. 100 cm

18.



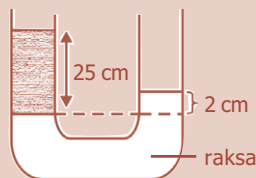
Sebuah bejana berbentuk seperti pada gambar di samping. Maka pernyataan berikut yang *tidak* benar adalah

- a. $P_A > P_B > P_C$
- b. $P_A > P_D > P_C$
- c. $P_A > P_B = P_E$
- d. $P_A > P_E > P_C$
- e. $P_A < P_B < P_C$

19. Perbandingan jari-jari pengisap kecil dan besar pada pompa hidrolik ialah 1 : 50. Jika berat beban yang diletakkan pada pengisap besar $4 \times 10^4 \text{ N}$, maka gaya terkecil yang harus dilakukan pada pengisap kecil adalah

- a. 8 N
- b. 10 N
- c. 16 N
- d. 20 N
- e. 40 N

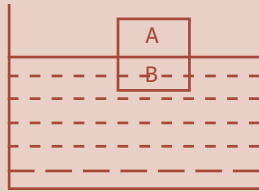
20.



Raksa pada bejana berhubungan mempunyai selisih 2 cm (massa jenis $= 13,6 \text{ g/cm}^3$). Kaki sebelah kiri berisi zat cair yang tingginya 25 cm, berarti massa jenis zat cair itu adalah

- a. 800 kg/m^3
- b. 1.030 kg/m^3
- c. 1.088 kg/m^3
- d. 1.300 kg/m^3
- e. 1.360 kg/m^3

21.



Gambar di samping menunjukkan sebuah benda yang terapung pada zat cair yang massa jenisnya 1.200 kg/m^3 . Bila diketahui bagian A adalah $\frac{1}{5}$ dari benda, maka massa jenis benda tersebut adalah

- a. 600 kg/m^3
 - b. 960 kg/m^3
 - c. 1.000 kg/m^3
 - d. 1.200 kg/m^3
 - e. 1.600 kg/m^3
22. Gejala di bawah ini yang *tidak* menunjukkan gejala kapilaritas adalah
- a. kapur tulis menyerap tinta
 - b. air naik pada batang tumbuh-tumbuhan
 - c. minyak naik pada sumbu kompor
 - d. naiknya air pada sumur bor
 - e. sistem penyerapan zat makanan oleh sel-sel darah kita
23. Dua pipa kapiler A dan B dengan perbandingan garis tengah $1 : 2$ dimasukkan ke dalam air. Kenaikan air di dalam pipa adalah
- a. $1 : 2$
 - b. $1 : 4$
 - c. $2 : 1$
 - d. $4 : 1$
 - e. $4 : 3$
24. Jika fluida mengalir di dalam sebuah pipa yang diameter dan ketinggian ujungnya tidak sama, maka besaran yang konstan adalah
- a. energi potensial
 - b. energi kinetik
 - c. tekanan
 - d. kecepatan
 - e. debit

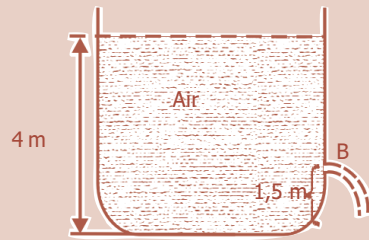
25.



Air mengalir melalui pipa yang bentuknya seperti pada gambar. Bila diketahui luas penampang di A dua kali penampang di B, maka $\frac{v_A}{v_B}$ sama dengan

- a. $\frac{1}{4}$
 - b. $\frac{1}{2}$
 - c. 1
 - d. 2
 - e. 4
26. Air mengalir di dalam pipa mendatar PQ. Kecepatan air di P dan Q masing-masing $1\frac{1}{3} \text{ m/s}$ dan 3 m/s , jari-jari penampang pipa di P adalah 3 cm . Maka jari-jari penampang pipa di Q serta jumlah air yang keluar dari lubang Q selama $1/\pi$ menit adalah
- a. 5 cm dan 75 liter
 - b. 4 cm dan 74 liter
 - c. 3 cm dan 73 liter
 - d. 2 cm dan 72 liter
 - e. 1 cm dan 70 liter

27.



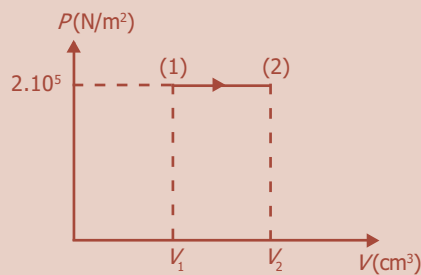
Bak yang luas penampangnya dianggap sangat luas, mula-mula berisi air setinggi 4 m. Lubang kebocoran di B yang luas penampangnya $0,8 \text{ cm}^2$ berada 1,5 m dari dasar bak ($g = 9,8 \text{ m/s}^2$). Debit air yang mula-mula memancar dari lubang B adalah

- a. $5,0 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$
 - b. $5,2 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$
 - c. $5,4 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$
 - d. $5,6 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$
 - e. $5,8 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$
28. Sebuah pesawat terbang dapat terbang ke angkasa karena
- a. perbedaan tekanan dari aliran-aliran udara
 - b. pengaturan titik berat pesawat
 - c. gaya angkat dari mesin pesawat
 - d. perubahan momentum dari pesawat
 - e. berat pesawat lebih kecil daripada berat udara yang dipindahkan
29. Massa jenis suatu gas ideal pada suhu T dan tekanan P adalah ρ . Jika tekanan gas dinaikkan menjadi $2P$ dan suhunya diturunkan menjadi $0,5T$, maka massa jenis gas adalah
- a. 4ρ
 - b. 2ρ
 - c. $0,5\rho$
 - d. $0,25\rho$
 - e. $0,12\rho$
30. Sejumlah gas ideal mengalami proses isobarik sehingga pada suhu kelvin menjadi dua kali semula, maka volumenya menjadi n kali semula, dengan n adalah
- a. 4
 - b. 3
 - c. 2
 - d. $\frac{1}{2}$
 - e. $\frac{1}{4}$
31. Gas dalam tabung yang suhunya 27°C dipanaskan pada volume tetap, hingga kecepatan rata-rata partikel gas menjadi dua kali semula. Hal ini menunjukkan kenaikan suhu gas tersebut sebesar
- a. 27°C
 - b. 300°C
 - c. 600°C
 - d. 900°C
 - e. 1.200°C
32. Pada suhu tinggi, gas diatomik dalam ruang tertutup mempunyai energi dalam sebesar
- a. $\frac{9}{2} nRT$
 - b. $\frac{7}{2} nRT$
 - c. $\frac{5}{2} nRT$
 - d. $\frac{3}{2} nRT$
 - e. $\frac{2}{3} nRT$

33. Sejumlah gas oksigen (massa molekul relatif = 32) memiliki suhu mutlak empat kali dari sejumlah gas hidrogen (massa molekul relatif = 2). Perbandingan kelajuan efektif molekul-molekul oksigen dengan molekul-molekul hidrogen adalah

- a. $\frac{1}{4}$ d. 2
b. $\frac{1}{2}$ e. 4
c. 1

34.



Perhatikan grafik hubungan tekanan (P) terhadap volume (V) di samping. Jika $V_1 = 100 \text{ cm}^3$ dan usaha yang dilakukan gas dari keadaan (1) ke keadaan (2) adalah 40 joule, maka V_2 adalah

- a. 100 cm^3
b. 200 cm^3
c. 300 cm^3
d. 400 cm^3
e. 500 cm^3

35. Gas helium sebanyak $1,5 \text{ m}^3$ yang bersuhu 27°C dipanaskan secara isobarik sampai 87°C . Jika tekanan gas helium $2 \times 10^5 \text{ N/m}^2$, gas helium melakukan usaha luar sebesar

- a. 60 kJ d. 480 kJ
b. 120 kJ e. 660 kJ
c. 280 kJ

36. Sebuah mesin kalor yang bekerja antara *reservoir* suhu rendah 27°C dan *reservoir* suhu tinggi $t_1^\circ\text{C}$ akan ditinggikan efisiensi maksimumnya dari 25% menjadi 50% dengan menaikkan suhu t_1 menjadi t_2 . Suhu t_1 dan t_2 adalah

- a. 36°C dan 54°C d. 300°C dan 400°C
b. 54°C dan 108°C e. 400°C dan 600°C
c. 127°C dan 327°C

37. Usaha yang dilakukan oleh gas ideal yang mengalami proses isobarik dari tekanan P_1 sampai P_2 adalah

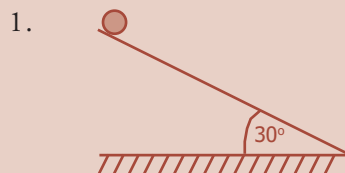
- a. 0 d. $(P_1 + P_2)V$
b. $P_1 \cdot V_2$ e. $(P_1 - P_2)V$
c. $P_2 \cdot V_2$

38. Sebuah mesin Carnot membangkitkan tenaga 2.000 joule dari *reservoir* bersuhu 1.200 K ke *reservoir* 400 K. Maka mesin pada saat itu menghabiskan energi sebesar

- a. 2.500 J d. 3.600 J
b. 3.000 J e. 6.000 J
c. 3.200 J

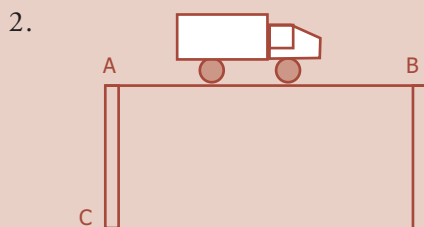
39. Sebuah mesin Carnot bekerja pada suhu *reservoir* antara 300 K dan 750 K. Efisiensi mesin tersebut adalah
- 80%
 - 75%
 - 70%
 - 65%
 - 60%
40. Sebuah mesin Carnot *reservoir* suhu rendahnya 27 °C, daya gunanya 40%. Daya gunanya akan diperbesar menjadi 50%, maka *reservoir* suhu tingginya harus dinaikkan sebesar
- 25 K
 - 50 K
 - 75 K
 - 100 K
 - 150 K

B. Jawablah dengan singkat dan benar!

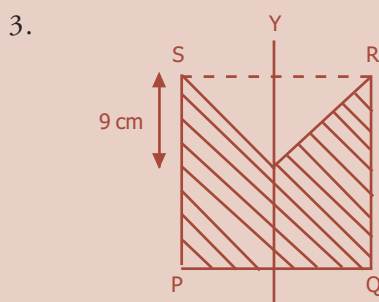


Massa benda A 20 kg berbentuk bola pejal menggelinding sempurna di sepanjang bidang miring ($\alpha = 30^\circ$). Jika $g = 10 \text{ m/s}^2$, jari-jari bola 20 cm, tentukan:

- percepatan bola menuruni bidang miring,
- momentum sudut saat 2 sekon setelah bola dilepas!



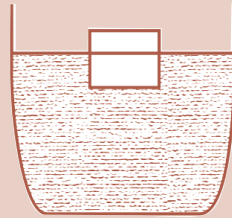
Sebuah truk yang massanya 1,5 ton berhenti di atas jembatan AB. Panjang AB = 30 m, AC = 10 m, dan $g = 10 \text{ m/s}^2$. Apabila massa jembatan diabaikan, hitunglah gaya normal di A dan B!



Suatu bidang datar homogen berbentuk bujur sangkar PQRS dengan rusuk 18 cm seperti tampak pada gambar. Tentukan letak titik berat bidang yang diarsir!

4. Suatu kempa hidrolik mempunyai dua penampang yang jari-jarinya masing-masing 2 cm dan 5 cm. Jika penampang kecil diberi gaya 10 N, berapa gaya maksimum yang dihasilkan pada penampang besar?

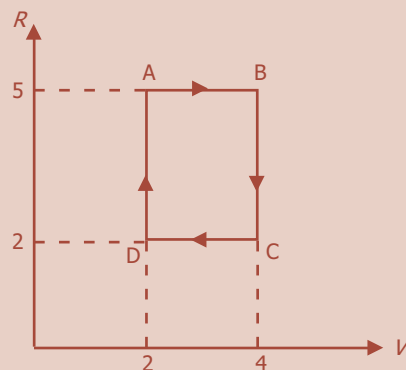
5.



Gambar di samping adalah bak berisi air ($\rho = 1 \text{ g/cm}^3$). Di dalamnya mengapung sebuah kubus yang massa jenisnya $0,72 \text{ g/cm}^3$ dan rusuknya 10 cm. Hitung berapa cm kubus yang muncul di atas permukaan air!

6. Suatu pipa AB dilalui air dari ujung A ke B. Pipa berada pada ketinggian 1,25 m di atas bidang datar. Diameter penampang pada kedua ujungnya masing-masing 6 cm dan 3 cm. Ternyata air dari ujung B memancar jatuh di tanah hingga menempuh jarak 2 m. Hitunglah kecepatan air di dalam pipa besar!
7. Air terjun setinggi 10 m dengan debit $50 \text{ m}^3/\text{s}$ dimanfaatkan untuk memutar turbin yang menggerakkan generator untuk menghasilkan energi listrik. Jika 25% energi air berubah menjadi energi listrik dan $g = 10 \text{ m/s}^2$, maka hitunglah daya keluaran generator tersebut!
8. Berapakah energi dalam gas monoatomik 5 mol apabila energi kinetik rata-rata sebesar $8,28 \times 10^{-21} \text{ J}$?

9.



Sejumlah gas ideal menjalani siklus A-B-C-D-A (lihat gambar) dengan suhu di titik C sebesar 400 K.

Tentukan:

- kalor yang diserap per siklus,
- usaha yang dihasilkan per siklus,
- perubahan energi dalam gas per siklus!

10. Satu siklus Carnot suhu mutlak *reservoir* suhu tinggi tiga kali *reservoir* suhu rendahnya. Jika usaha yang dilakukan 1.200 J, tentukan kalor yang dilepas pada *reservoir* suhu rendah!

GLOSARIUM

adhesi	: gaya tarik-menarik molekul-molekul zat tidak sejenis
adiabatik	: proses yang berlangsung tanpa perpindahan kalor baik kalor yang masuk maupun yang keluar dari sistem
anomali	: sifat kekecualian air; jika air dipanaskan hingga suhu 0 - 4 °C volumenya akan menyusut
argon	: nama unsur kimia dengan nomor atom 18 dan nomor massa 39,95
daya	: laju perpindahan atau perubahan energi atau besar energi per satuan waktu
dinamika	: ilmu yang mempelajari tentang gerak dan gaya penyebabnya
energi kinetik	: energi yang dimiliki pada saat benda bergerak
energi potensial	: energi yang dimiliki oleh benda diam
frekuensi	: jumlah suatu getaran setiap waktu
gas ideal	: keadaan gas yang dianggap sempurna, memiliki sifat tertentu sehingga dapat diterapkan pada teori kinetik gas
gerak lurus	: gerak yang lintasannya berupa garis lurus
gerak melingkar	: gerak yang lintasannya berupa lingkaran
gravitasi	: percepatan yang timbul akibat adanya gaya gravitasi bumi
helium	: unsur kimia dengan nomor atom 2 dan massa atom 4,0026
impuls	: gaya yang bekerja pada waktu yang singkat pada peristiwa tumbukan
isobarik	: proses perubahan keadaan sistem pada tekanan konstan
isokhorik	: proses yang berlangsung tanpa perubahan volume
isotermal	: proses termodinamika yang berlangsung tanpa perubahan suhu
kapasitas kalor	: kapasitas panas; panas yang diserap atau dilepaskan oleh benda saat suhunya berubah sebesar 1 K
kecepatan	: lintasan benda bergerak setiap waktu
kinematika	: cabang fisika yang mempelajari gerak benda tanpa meninjau gaya penyebabnya
kripton	: unsur kimia dengan nomor atom 36 dan memiliki massa atom 83,80
manometer	: alat pengukur tekanan udara di dalam ruang tertutup
mekanika	: ilmu pesawat, ilmu yang mempelajari tentang gerak dan gaya
meniskus	: melengkungnya permukaan zat cair dalam pipa kapiler
momentum	: hasil kali antara massa benda dengan kecepatan benda tersebut
neon	: unsur kimia dengan nomor atom 10 dan massa atom 20,179
paralel	: sejajar dan ujung-ujungnya bertemu pada satu titik atau satu bagian yang sama
pegas	: suatu kumparan kawat berbentuk tali terpilin
percepatan	: perubahan kecepatan setiap waktu
periode	: waktu yang diperlukan benda untuk melakukan satu kali getaran, gerak gelombang, atau proses berulang lainnya
resultan	: jumlah secara vektor
simpangan	: jarak titik dihitung dari kedudukan kesetimbangan awal
termodinamika	: cabang dari ilmu fisika yang mempelajari tentang proses perpindahan energi sebagai kalor dan usaha antara sistem dan lingkungan
tegangan	: suatu istilah fisika yang berarti beda potensial
usaha	: kerja; perkalian antara gaya penyebab gerak dengan jarak perpindahan
viskositas	: kekentalan; hambatan dari fluida mengalir

DAFTAR PUSTAKA

- Alan Isaacs. 1994. *Kamus Lengkap Fisika, terjemahan Danusantoso*. Jakarta: Erlangga.
- Alonso, Finn. 1990. *Fundamental University Physics*. New York: Addison Wesley Publishing Company.
- Bridgman, Roger. 2000. *Jendela Iptek Teknologi, terjemahan Pusat Penerjemahan FSUI*. Jakarta: PT Balai Pustaka.
- Britannica Encyclopedia. 2006.
- Challoner, Jack. 2004. *Jendela Iptek Energi, terjemahan Pusat Penerjemahan FSUI*. Jakarta: PT Balai Pustaka.
- Corrine Stockley, Chris Oxlade, Jane Worthheim. 2000. *Kamus Fisika Bergambar*. Jakarta: Erlangga.
- Estien Yazid. 2005. *Kimia Fisika untuk Paramedis*. Yogyakarta: Andi Offset.
- Esvandiari. 2006. *Smart Fisika SMA*. Jakarta: Puspa Swara.
- Fish Bane P.M. 1996. *Physics*. New Jersey: Prentice Hall-Inc.
- Forum, 11 Agustus 1997.
- Ganijanti Aby Saroyo. 2002. *Seri Fisika Dasar Mekanika*. Jakarta: Salemba Teknik.
- Giancoli, Douglas. 2001. *Fisika Jilid 1*. Jakarta: Erlangga.
- Halliday dan Resnick. 1999. *Fisika Jilid I, terjemahan Pantur Silaban dan Erwin S*. Jakarta: Erlangga.
- Ismail Besari. 2005. *Kamus Fisika*. Bandung: Pionir Jaya.
- Jawa Pos, 24 Agustus 2006.
- _____, 17 November 2006.
- Lafferty, Peter. 1997. *Jendela Iptek Gaya & Gerak, terjemahan Pusat Penerjemahan FSUI*. Jakarta: PT Balai Pustaka.
- Lilik Hidayat Setyawan. 2004. *Kamus Fisika Bergambar*. Bandung: Pakar Raya.
- Mary and John Gribbin. 2004. *Jendela Iptek Ruang & Waktu, terjemahan Pusat Penerjemahan FSUI*. Jakarta: PT Balai Pustaka.
- Mundilarto. 1992. *Fisika Dasar II*. Jakarta: Universitas Terbuka.
- Norman O, Smith. 1994. *Elementary Statistical Thermodynamics*. New York: Plenum Press.
- Peter Soedoyo. 2004. *Fisika Dasar*. Yogyakarta: Andi Offset.
- Sears, I.W dan Zemansky, M.W.1994. *Fisika untuk Universitas, terjemahan Endang Juliastuti*. Bandung: Bina Cipta.

- Steve Setford. 1996. *Buku Saku Fakta Sains, terjemahan Hariri*. Jakarta: Erlangga.
- Suroso Ay, Anna P., Kardiawarman. 2003. *Ensiklopedi Sains dan Kehidupan*. Jakarta: CV Tarity Samudra Berlian.
- Sussana van Rose. 2000. *Jendela Iptek Bumi, terjemahan Pusat Penerjemahan FSUI*. Jakarta: PT Balai Pustaka.
- Sutrisno. 1982. *Fisika Dasar*. Bandung: Penerbit ITB.
- Team Depdiknas. 1979. *Energi, Gelombang, dan Medan*. Jakarta: PT Balai Pustaka.
- Team Depdiknas. *Kurikulum 2004 Mata Pelajaran Fisika SMA/MA*. Jakarta.
- Tempo, Januari 2006.
- _____, Oktober 2006.
- Tim Ensiklopedia. 2005. *Ensiklopedi Umum untuk Pelajar Jilid 1*. Jakarta: PT Ichtiar Baru van Hoeve.
- _____. 2005. *Ensiklopedi Umum untuk Pelajar Jilid 2*. Jakarta: PT Ichtiar Baru van Hoeve.
- _____. 2005. *Ensiklopedi Umum untuk Pelajar Jilid 3*. Jakarta: PT Ichtiar Baru van Hoeve.
- _____. 2005. *Ensiklopedi Umum untuk Pelajar Jilid 4*. Jakarta: PT Ichtiar Baru van Hoeve.
- _____. 2005. *Ensiklopedi Umum untuk Pelajar Jilid 5*. Jakarta: PT Ichtiar Baru van Hoeve.
- _____. 2005. *Ensiklopedi Umum untuk Pelajar Jilid 6*. Jakarta: PT Ichtiar Baru van Hoeve.
- _____. 2005. *Ensiklopedi Umum untuk Pelajar Jilid 7*. Jakarta: PT Ichtiar Baru van Hoeve.
- _____. 2005. *Ensiklopedi Umum untuk Pelajar Jilid 8*. Jakarta: PT Ichtiar Baru van Hoeve.
- _____. 2005. *Ensiklopedi Umum untuk Pelajar Jilid 9*. Jakarta: PT Ichtiar Baru van Hoeve.
- _____. 2005. *Ensiklopedi Umum untuk Pelajar Jilid 10*. Jakarta: PT Ichtiar Baru van Hoeve.
- Wylen. 1992. *Fundamental of Classical Thermodynamics*. New York: John Wiley and Sons, Inc.
- Zemansky, M.W. 1992. *Heat and Thermodynamics*. New York: Mc Graw Hill Book Company, Inc.

DAFTAR KONSTANTA

Konstanta-Konstanta Dasar			
Besaran	Simbol	Nilai Pendekatan	Nilai Terbaik yang Terakhir
Laju cahaya di ruang hampa	c	$3,00 \times 10^8 \text{ m/s}$	$2,99792458 \times 10^8 \text{ m/s}$
Konstanta gravitasi	G	$6,67 \times 10^{-11} \text{ Nm}^2/\text{m}$	$6,67259 ((85) \times 10^{-11} \text{ Nm}^2/\text{kg}^2)$
Bilangan Avogadro	N_A	$6,02 \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}$	$6,0221367(36) \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}$
Konstanta gas	R	$8,315 \text{ J/mol.K} = 1,99 \text{ kal/mol.K}$ $= 0,082 \text{ atm.liter/mol.K}$	$8,314510(70) \text{ J/mol.K}$
Konstanta Boltzmann	k	$1,38 \times 10^{-23} \text{ J/K}$	$1,380658(12) \times 10^{-23} \text{ J/K}$
Muatan elektron	e	$1,60 \times 10^{-19} \text{ C}$	$1,6021733(49) \times 10^{-19} \text{ C}$
Konstanta Stefan Boltzmann	σ	$5,67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4$	$5,67051(19) \times 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4$
Permittivitas hampa udara	$\epsilon_0 = (1/c^2 \mu_0)$	$8,85 \times 10^{-12} \text{ C}^2/\text{Nm}^2$	$8,854187817... \times 10^{-12} \text{ C}^2/\text{Nm}^2$
Permeabilitas hampa udara	μ_0	$4\pi \times 10^{-7} \text{ T.m/A}$	$1,2566370614... \times 10^{-6} \text{ T.m/A}$
Konstanta Planck	h	$6,63 \times 10^{-34} \text{ J.s}$	$6,6260755(40) \times 10^{-34} \text{ J.s}$
Massa diam elektron	m_e	$9,11 \times 10^{-31} \text{ kg} = 0,000549 \text{ u}$ $= 0,511 \text{ MeV}/c^2$	$9,1093897(54) \times 10^{-31} \text{ kg}$ $= 5,48579903(13) \times 10^{-4} \text{ sma}$
Massa diam proton	m_p	$1,67726 \times 10^{-27} \text{ kg} = 1,00728 \text{ u}$ $= 938,3 \text{ MeV}/c^2$	$1,6726231(10) \times 10^{-27} \text{ kg}$ $= 1,007276479(12) \text{ sma}$
Massa diam neutron	m_n	$1,6749 \times 10^{-27} \text{ kg} = 1,00728 \text{ u}$ $= 938,3 \text{ MeV}/c^2$	$1,6749286(10) \times 10^{-27} \text{ kg}$ $= 1,008664904(14) \text{ sma}$
Satuan massa atom (sma)	u	$1,6605 \times 10^{-27} \text{ kg} = 931,5 \text{ MeV}/c^2$	$1,6605402(10) \times 10^{-27} \text{ kg}$ $= 931,49432(28) \text{ MeV}/c^2$

Daftar Alfabet Yunani

Alpha	A	α	Nu	N	ν
Beta	B	β	Xi	Ξ	ξ
Gamma	Γ	γ	Omicron	O	o
Delta	Δ	δ	Pi	Π	π
Epsilon	E	ϵ	Rho	P	ρ
Zeta	Z	ζ	Sigma	Σ	σ
Eta	H	η	Tau	T	τ
Theta	Θ	θ	Upsilon	Y	υ
Iota	I	ι	Phi	Φ	ϕ, φ
Kappa	K	κ	Chi	X	χ
Lambda	Λ	λ	Psi	Ψ	ψ
Mu	M	μ	Omega	Ω	ω

Satuan Turunan SI dan Singkatannya

Besaran	Satuan	Singkatan	Dalam Satuan Dasar
Gaya	newton	N	kg.m/s^2
Energi dan kerja	joule	J	$\text{kg.m}^2/\text{s}^2$
Daya	watt	W	$\text{kg.m}^2/\text{s}^3$
Tekanan	pascal	Pa	$\text{kg}/(\text{m.s}^2)$
Frekuensi	hertz	Hz	s^{-1}
Muatan listrik	coulomb	C	A.s
Potensial listrik	volt	V	$\text{kg.m}^2/(\text{A.s}^3)$
Hambatan listrik	ohm	Ω	$\text{kg.m}^2/(\text{A}^2.\text{s}^3)$
Kapasitansi	farad	F	$\text{A}^2.\text{s}^4/(\text{kg.m}^2)$
Medan listrik	tesla	T	$\text{kg}/(\text{A.s}^2)$
Fluks magnetik	weber	Wb	$\text{kg.m}^2/(\text{A.s}^2)$
Induktansi	henry	H	$\text{kg.m}^2/(\text{s}^2.\text{A}^2)$

Konversi Satuan (Ekuivalen)

Panjang

1 inci	= 2,54 cm
1 cm	= 0,394 inci
1 ft	= 30,5 cm
1 m	= 39,37 inci = 3,28 ft
1 mil	= 5280 ft = 1,61 km
1 km	= 0,621 mil
1 mil laut (U.S)	= 1,15 mil = 6076 ft = 1,852 km
1 fermi	= 1 femtometer (fm) = 10^{-15} m
1 angstrom (Å)	= 10^{-10} m
1 tahun cahaya (ly)	= $9,46 \times 10^{15}$ m
1 parsec	= 3,26 ly = $3,09 \times 10^{16}$ m

Laju

1 mil/h	= 1,47 ft/s = 1,609 km/h = 0,447 m/s
1 km/h	= 0,278 m/s = 0,621 mil/h
1 ft/s	= 0,305 m/s = 0,682 mil/h
1 m/s	= 3,28 ft/s = 3,60 km/h
1 knot	= 1,151 mil/h = 0,5144 m/s

Sudut

1 radian (rad)	= $57,30^\circ = 57^\circ 18'$
1°	= 0,01745 rad
1 rev/min (rpm)	= 0,1047 rad/s

Volume

1 liter (L)	= 1.000 mL = $1.000 \text{ cm}^3 = 1,0 \times 10^{-3} \text{ m}^3$
	= 1,057 quart (U.S) = 54,6 inci ³
1 gallon (U.S)	= 4 qt (U.S) = 231 in. ³ = 3,78 L
	= 0,83 gal (imperial)
1 m ³	= 35,31 ft ³

Massa

1 satuan massa atom (u)	= $1,6605 \times 10^{-27}$ kg
1 kg	= 0,0685 slug
(1 kg mempunyai berat 2,20 lb dimana g = 9,81 m/s ²)	

Gaya

1 lb	= 4,45 N
1 N	= 10^5 dyne = 0,225 lb

Waktu

1 hari	= $8,64 \times 10^4$ s
1 tahun	= $3,156 \times 10^7$ s

Tekanan

1 atm	= 1,013 bar = $1,013 \times 10 \text{ N/m}^2$
	= 14,7 lb/inci ² = 760 torr
1 lb/inci ²	= $6,90 \times 10^3 \text{ N/m}^2$
1 Pa	= $1 \text{ N/m}^2 = 1,45 \times 10^{-4} \text{ lb/inci}^2$

Energi dan Kerja

1 J	= 10^7 ergs = 0,738 ft.lb
1 ft.lb	= 1,36 J = $1,29 \times 10^{-3}$ Btu = $3,24 \times 10^{-4}$ kkal
kkal	= $4,18 \times 10^3$ J = 3,97 Btu
1 eV	= $1,602 \times 10^{-19}$ J
1 kWh	= $3,60 \times 10^6$ J = 860 kkal

Daya

1 W	= 1 J/s = 0,738 ft.lb/s = 3,42 Btu/h
1 hp	= 550 ft.lb/s = 746 W

Tabel Periodik Unsur

[illegible]

71	Lu
70	Yb
69	Tm
68	Er
67	Ho
66	Dy
65	Tb
64	Gd
63	Eu
62	Sm
61	Pm
60	Nd
59	Pr
58	Ce

103	Li
102	No
101	Md
100	Fm
99	Es
98	Cf
97	Bk
96	Cm
95	Am
94	Pu
93	Np
92	U
91	Pa
90	Th

☒ Blok s ☒ Blok p ☒ Blok d ☒ Blok f

O

orbit satelit 37, 43

P

paralel 46, 52, 53, 55, 56, 57, 65
pegas 46, 48, 49, 52, 53, 54, 55, 56, 57, 60, 61, 62, 63, 64, 65, 66, 67
percepatan 1, 2, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 15, 19, 20, 21, 22, 23, 25, 26, 27, 28, 29, 32, 34, 35, 36, 37, 38, 43, 44, 45, 46, 57, 58, 59, 60, 64, 66
percepatan gravitasi 34, 35, 36, 37, 38, 43, 44, 45
percepatan sudut 112, 116, 117, 119, 121, 133, 135
periode 46, 54, 55, 57, 64, 67
persamaan kontinuitas 159, 160, 161, 163, 171
perubahan energi 68, 70, 74, 75, 76, 77, 82, 83, 85

R

regangan 49, 50, 51, 53, 64, 67
Robert Hooke 52

rotasi 111, 112, 113, 114, 116, 117, 118, 119, 120, 121, 122, 123, 125, 133, 134, 135

S

Sadi Carnot 208, 213
seri 46, 53, 55, 56, 67
siklus Carnot 206, 208, 209, 213
simpangan 46, 54, 57, 58, 59, 60, 61, 63, 64, 66, 67

T

tabung pitot 165
tegangan 46, 48, 49, 50, 51, 53, 64, 67
tekanan hidrostatik 140, 142, 143, 144, 145, 147, 163, 164, 170
teori Torricelli 162, 163, 172
termodinamika 196, 197, 198, 199, 202, 203, 204, 207, 208, 210, 211, 213
Thomas Young 62
titik berat 110, 112, 126, 127, 128, 130, 131, 132, 133, 134, 136, 137, 138, 139
tumbukan 86, 88, 89, 90, 91, 92, 93, 94, 95, 96, 99, 100, 101

tumbukan lenting sebagian 86, 92, 93, 94, 95, 99, 101

tumbukan lenting sempurna 86, 92, 93, 99, 100

tumbukan tidak lenting 86, 92, 93, 94, 96, 99

U

usaha 61, 64, 68, 69, 70, 71, 72, 73, 74, 75, 76, 77, 78, 82, 83, 84, 85

V

vektor 1, 2, 3, 4, 6, 8, 9, 10, 12, 13, 14, 15, 16, 25
vektor posisi 3, 4, 5, 13, 25
vektor satuan 2, 3, 5, 9, 25
venturimeter 162, 163, 164, 165, 167, 169, 172, 174

X

xenon 178



ISBN 978-979-068-166-8 (no.jld.lengkap)

ISBN 978-979-086-172-9

Buku ini telah dinilai oleh Badan Standar Nasional Pendidikan (BSNP) dan telah dinyatakan layak sebagai buku teks pelajaran berdasarkan Peraturan Menteri Pendidikan Nasional Nomor 22 Tahun 2007 tanggal 25 Juni 2007 Tentang Penetapan Buku Teks Pelajaran Yang Memenuhi Syarat Kelayakan Untuk Digunakan Dalam Proses Pembelajaran.

HARGA ECERAN TERTINGGI (HET) Rp. 12.628,-